Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Механічний факультет
Кафедра автоматизації і комп’ютерно-інтегрованих технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ TOPSIS ДЛЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф. О.Г. Гурко

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доцент І.Г. Ільге

Керівник, канд. техн. наук, доцент Н.Ю. Філь

Студент гр. МА-61-24 І.О. Коломієць

Харків – 2025

ЗАТВЕРДЖЕНО
Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України
29 березня 2012 року № 384
Форма № Н-9.01

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет центр освітніх послуг
Кафедра АКІТ
Освітній рівень магістр
Спеціальність, спеціалізація 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри,
проф. О.Г. Гурко
"____" _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Коломійцю Івану Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Використання методу TOPSIS для вибору технології дорожнього покриття
керівник роботи Філь Н.Ю.. к.т.н., доцент
затверджені рішенням Вченої ради механічного факультету від «5» вересня 2025 року №1
2. Строк подання студентом роботи « 1 » грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: MS Office, ресурси Internet
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1 Аналіз проблеми вибору дорожнього покриття для автомобільних доріг. Мета, предмет, об'єкт і задачі дослідження. 2 Інформаційна технологія вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва. 3. Багатокритеріальний аналіз як інструмент підтримки прийняття рішень 4. Вибір оптимальної технології дорожнього покриття на основі методу TOPSIS. Висновки. Перелік посилань.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Мета, об'єкт, предмет і задачі дослідження 2. Структурна модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва 3. Загальна постановка задачі. 4. Етапи методу TOPSIS. 5. Альтернативи. 6. Оцінки альтернатив експертами. 7. Нормовані матриці рішень 8. Побудова ідеального та негативного рішення. 9. Побудова відстані до ідеального та негативного рішення для кожного експерта 10. Обчислення агрегованої відстані до ідеального та негативного рішення для всіх експертів 11. Висновки

6.Консультанти розділів кваліфікаційної роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Основна частина	к.т.н. доц. Філь Н.Ю.		

7. Дата видачі завдання « 1 » вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Найменування етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблеми вибору дорожнього покриття для автомобільних доріг. Мета, предмет, об’єкт і задачі дослідження.	9.09.2025-15.09.2025	10%
2	Інформаційна технологія вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва	15.09.2025-30.09.2025	30%
3	Аналіз методів прийняття рішень за багатьма критеріями	30.09.2025-15.10.2025	50%
4	Вибір оптимальної технології дорожнього покриття на основі методу TOPSIS	15.10.2025-30.10.2025	70%
5	Висновки.	30.10.2025-15.11.2025	90%
6	Оформлення роботи. Підготовка до захисту	15.11.2025-1.12.2025	95%
7	Подання до захисту	1.12.2025	100%

Студент _____ Коломієць І.О.

Керівник роботи к.т.н. доц. _____Філь Н.Ю.

(підпис)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить: 74 сторінки, 21 рисунків, 4 таблиці, 23 джерела, 1 додаток.

АЛЬТЕРНАТИВА, АВТОМОБІЛЬНА ДОРОГА, ДОРОЖНЄ ПОКРИТТЯ, КРИТЕРІЙ, МЕТОД TOPSIS

Метою дослідження є підвищення ефективності проєктів дорожнього будівництва за рахунок розробки методу для вибору технології дорожнього покриття за багатьма критеріями.

Об'єкт дослідження – проєкти дорожнього будівництва

Предмет дослідження – метод TOPSIS для вибору дорожнього покриття за багатьма функціональними та вартісними критеріями.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

Основні завдання та характеристики бажаних результатів (наукові або практичні): проведено аналіз проблеми автомобільно-дорожнього будівництва; розроблено структурну модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття; проведено аналіз багатокритеріальних методів прийняття рішень; розроблено метод вибору дорожнього покриття за багатьма критеріями; наведено приклад використання розробленого методу вибору дорожнього покриття за багатьма критеріями.

Для розрахунків було використано програмний засіб Microsoft Excel.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів 6
Вступ 7
1 Аналіз проблеми вибору дорожнього покриття для автомобільних доріг 9
1.1 Розвиток автомобільних доріг в Україні 9
1.2 Завдання та принципи конструювання дорожніх одягів 13
1.3 Найякісніші автомобільні дороги у світі 17
1.4 Мета, предмет, об’єкт і задачі дослідження 20
2 Інформаційна технологія вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва 22
2.1 Розробка структурної моделі інформаційної технології вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва 22
2.2 Економічне обґрунтування вибору варіанту конструкцій дорожнього одягу 28
3 Багатокритеріальний аналіз як інструмент підтримки прийняття рішень 33
3.1 Методи багатокритеріального аналізу 33
3.2 Загальна постановка задачі прийняття рішення 37
3.3 Метод TOPSIS 38
3.4 Агрегування думок для ухвалення групового рішення методом TOPSIS 40
4 Вибір оптимальної технології дорожнього покриття на основі методу TOPSIS 43
Висновки 57
Перелік посилань 58
Додаток А. Ілюстративний матеріал до кваліфікаційної роботи магістра 61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АД – автомобільна дорога;

БКА – багатокритеріальний аналіз;

ІТС – інтелектуальні транспортні системи;

МАІ – метод аналізу ієрархій;

НІР – негативне ідеальне рішення;

ОПР – особа, яка приймає рішення;

ПІР – позитивне ідеальне рішення;

СУДП – системи управління дорожнім покриттям;

ТДБ – технології дорожнього будівництва;

MAVT – Multiple-Attribute Value Theory;

MAUT – Multi-Attribute Utility Theory;

SMART – Simple Multi-Attribute Rating Technique;

TOPSIS – Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution.

ВСТУП

Архітектура та конструкція сучасних автомобільних доріг (АД) відіграють ключову роль у забезпеченні безпечного, зручного та сталого транспортного сполучення. Основними аспектами є всі етапи проєктування та будівництва АД, включаючи вибір матеріалів, технології зведення дорожніх покриттів, а також новітні тенденції та інновації в дорожньому будівництві. Особливу увагу необхідно приділити питанням стійкості АД до навантажень, довговічності матеріалів, а також екологічним аспектам і впливу на навколишнє середовище. Сучасні підходи в проєктуванні доріг полягають у використанні інтелектуальних транспортних систем і матеріалів нового покоління.

Високоякісне та наукове проєктування, будівництво, утримання та відновлення дорожніх покриттів – управління дорожнім покриттям – є важливим завданням, а у випадку державних доріг це є прямим обов'язком [1].

Моделі експлуатаційних характеристик дорожнього покриття мають прямий вплив на майбутній стан дорожнього покриття. Проєктування конструкції дорожнього покриття завжди є досить відповідальним і складним завданням, оскільки очевидно, що проєктувальник повинен прогнозувати (передбачати) експлуатаційні характеристики дорожніх конструкцій, які будуть побудовані в майбутньому. Надійність такого прогнозу, звичайно, в основному залежить від точності застосованих проєктних даних [4].

Складність питання можна охарактеризувати вже тим фактом, що при прогнозуванні експлуатаційних характеристик дорожнього покриття (очікуваного терміну служби) під час проєктування (вибору) оптимального варіанту конструкції дорожнього покриття слід враховувати, як мінімум, параметри, пов'язані з трафіком, навколишнім середовищем, сировиною, будівництвом, утриманням та відновленням, експлуатацією та фінансами (взаємозв'язок цих впливаючих параметрів лише ускладнює ситуацію) [4].

Таким чином, якість дорожнього покриття залежить від матеріалів (асфальт, бетон, щебінь), стану його поверхні (рівність, відсутність вибоїн), відповідності стандартам та інфраструктурних аспектів (ширина смуг, дренаж), що визначає безпеку та комфорт пересування, причому найкращі дороги у світі часто мають високий рейтинг завдяки інвестиціям та технологіям.

Якісне дорожнє покриття – це інвестиція в економіку, безпеку та комфорт.

Розробка науково-обґрунтованих рекомендацій щодо вибору оптимального варіанту дорожнього покриття для влаштування його верхнього шару на стадії конструювання дорожнього одягу є актуальним науково-прикладним завданням.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

1.1 Розвиток автомобільних доріг в Україні

Мережа автомобільних доріг в Україні історично формувалася з урахуванням потреб централізованої планової економіки, головною метою якої було забезпечення внутрішніх вантажних і пасажирських перевезень. Міжнародні транспортні зв'язки в цей період залишалися мінімальними та суворо регламентованими [2].

Розширення Європейського Союзу до кордонів України та активізація міжнародних торговельно-економічних відносин спричинили значне збільшення обсягів зовнішніх транспортних зв'язків.

За різними джерелами, сумарна довжина мережі автомобільних доріг України, включно з вулицями населених пунктів та іншими технологічними дорогами, призначеними переважно для руху автотранспорту, становить приблизно 730 тис. км.

Автомобільні дороги України поділяються на групи [2]:

а) автомобільні дороги загального користування – 169,2 тис. км;

б) вулиці і дороги населених пунктів – 322,4 тис. км;

г) відомчі (технологічні) автомобільні дороги – 237,9 тис. км;

Структура загальної мережі автомобільних доріг, визначених за такою класифікацією, показана на рисунку 1.1 [2].

За формою власності автомобільні дороги відносяться до:

а) загальнодержавної - автомобільні дороги загального користування та частина відомчих доріг – 184,9 тис. км;

б) комунальної (державної) - вулиці і дороги міст та інших населених пунктів та частина відомчих (технологічні) автомобільних доріг – 361,1 тис. км;

в) недержавної (громадська, колективна, приватна і власність міжнародних організацій) – відомчі (технологічні) автомобільні дороги юридичних осіб з недержавною формою власності, внутрішньогосподарські сільські дороги, автомобільні дороги на приватних територіях тощо – 184,0 тис. км;

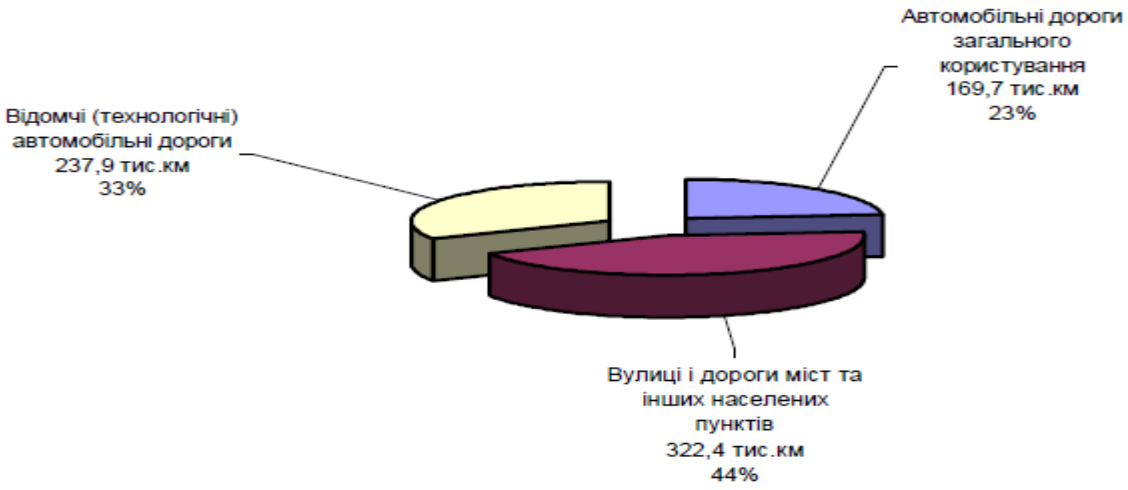


Рисунок 1.1 – Структура загальної мережі автомобільних доріг [2]

Структура мережі автомобільних доріг за формою власності показана на рисунку 1.2 [1].

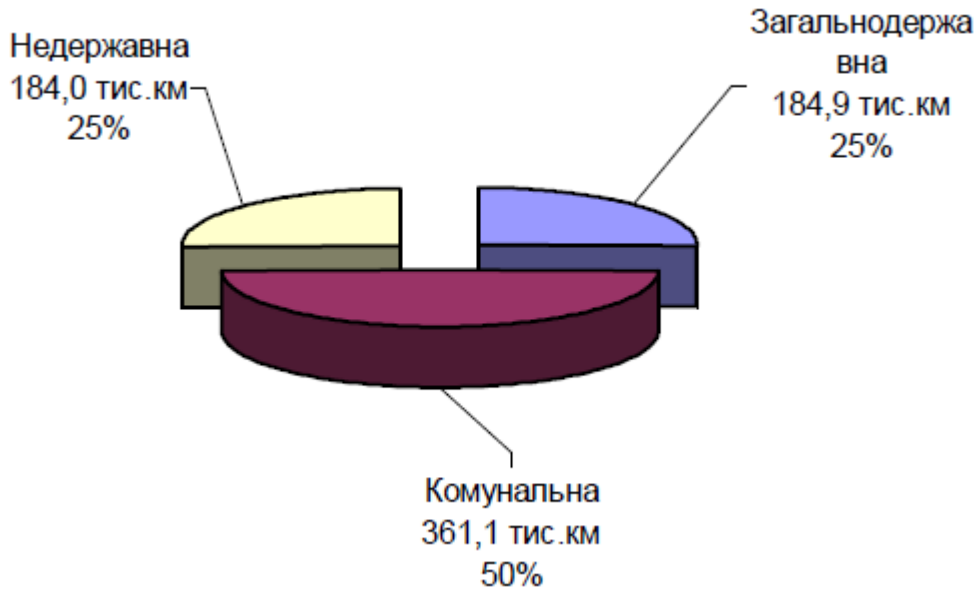


Рисунок 1.2 – Структура мережі автомобільних доріг за формою власності [2]

Автомобільні дороги загального користування забезпечують внутрішньодержавні (позаміські) та міжнародні перевезення пасажирів і вантажів, з'єднують населені пункти і є складовою частиною єдиної транспортної системи держави.

Автомобільні дороги загального користування є невід'ємною складовою частиною транспортної системи України, поєднуючи окремі види транспорту в єдину транспортну систему, значною мірою впливають на соціально-економічний розвиток держави [2]. На частку автотранспорту припадає близько 75 % обсягів вантажних перевезень та понад 80 % пасажирських [2].

Протяжність доріг державного значення становить 16,2 тис. км або 9,5% від усієї довжини автомобільних. Всі вони мають тверді покриття:

а) цементобетонні – 1,2 тис. км;

б) асфальтобетонні – 13,0 тис. км;

в) чорні шосе – 1,9 тис. км

г) щебеневі, гравійні, бруківки – менше 0,1 тис. км.

У свою чергу дороги державного значення поділяються на:

а) магістральні – 9,3 тис. км;

б) регіональні – 6,9 тис. км.

Автомобільні дороги місцевого значення, загальною протяжністю 153,5 км або 90,5 % усієї довжини мережі доріг загального користування поділяються на:

а) територіальні – 29,6 тис. км, у т.ч. з твердим покриттям 29,5 тис. км або 99,4 %.;

б) районні – 84,7 тис. км, у т.ч. з твердим покриттям 82,1 тис. км або 97,0 %;

в) сільські – 39,2 тис. км, у т.ч. з твердим покриттям 36,8 тис. км або 94 %.

Забезпеченість доріг твердим покриттям показано на рисунку 1.3.

За технічними характеристиками автомобільні дороги загального користування розподіляються на 5 категорій (рисунок 1.4).

Дороги І категорії в Україні мають загальну протяжність лише 2,2 тис. км, що становить 1,3 % від довжини всієї мережі автомобільних доріг загального

користування з твердим покриттям. Водночас аналіз інтенсивності руху свідчить, що їх довжина повинна наближатися до 10 тис. км.

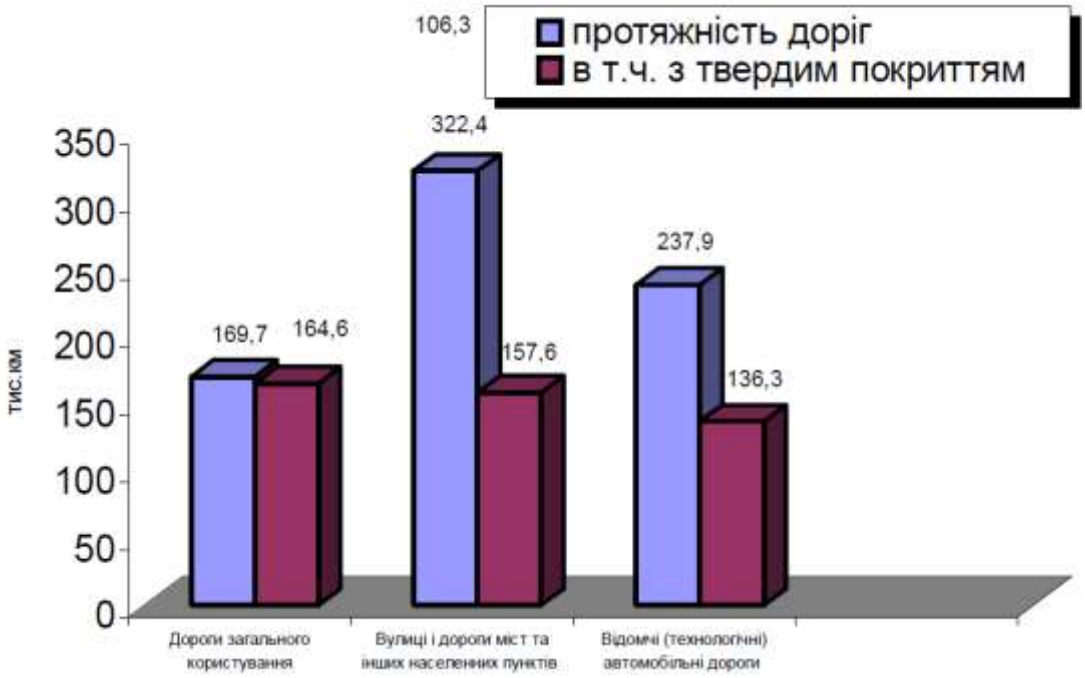


Рисунок 1.3 – Забезпеченість доріг твердим покриттям [2]

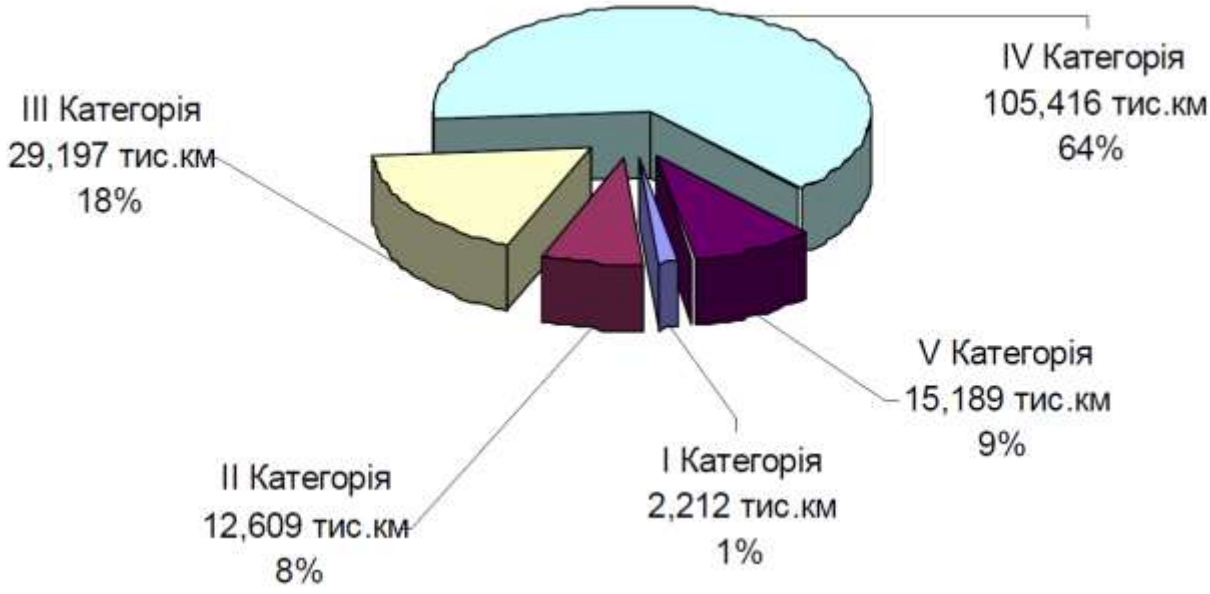


Рисунок 1.4 – Структура автомобільних доріг загального користування за технічними характеристиками [2]

Сукупна протяжність доріг I–III категорій, технічні характеристики яких найбільшою мірою відповідають сучасним вимогам, становить 44,0 тис. км (26,7 % від загальної мережі доріг з твердим покриттям). Інші дороги, окрім невідповідності сучасним нормам щодо ширини проїзної частини та рівня безпеки, також мають недостатню міцність дорожнього одягу, що не дозволяє забезпечувати цілорічний рух сучасного вантажного транспорту.

На території України досі тривають активні бойові дії, тому детальний аналіз стану доріг через війну не є можливим. Загальна сума прямих збитків, завданих інфраструктурі України внаслідок повномасштабного вторгнення Росії, досягла майже $170 млрд. У порівнянні з початком 2024 року ця цифра зросла на $12,6 млрд, що є наслідком подальших руйнувань через ракетні удари та бойові дії [3].

Україна за рівнем розвитку дорожньої інфраструктури суттєво відстає від інших країн світу і потребує значних інвестицій в дорожнє будівництво. Країна потребує імпорту бітуму і поступового нарощування обсягів будівництва бетонних доріг.

1.2 Завдання та принципи конструювання дорожніх одягів

Процедура проектування дорожнього покриття включає в себе [4]:

– вибір покриття;

– призначення кількості конструктивних шарів з вибором матеріалів і призначення їх орієнтовної товщини. Зазвичай конструкція дорожнє покриття складається з одно- або двошарового покриття, основи, що також складається з декількох шарів, і додаткового шару основи;

– призначення морозо- або теплозахисних заходів, а також заходів щодо підвищення тріщиностійкості та зсувостійкості шарів, чутливих до тепловологісних впливів.

Матеріали шарів повинні розташовуватися по товщині дорожнього покриття з урахуванням міцності. Міцність шару матеріалу повинна зменшуватися зверху вниз.

Дорожнє полотно, що відповідає сучасним вимогам, повинно забезпечувати безпечний і комфортний рух транспортних засобів. Фактично дорожнє полотно являє собою конструкцію з декількох конструктивних шарів, прихованих під видимим асфальтобетонним покриттям.

Кожен із шарів дорожнього полотна виконує певні функції, необхідні для забезпечення працездатності автомобільної дороги. Крім влаштування всіх необхідних технологічних шарів, потрібно також дотримуватися технології будівництва доріг і укладання асфальту. Чим вища категорія і розрахункова завантаженість автодороги, тим міцнішою повинна бути конструкція».

Деякі типи автодоріг, що мають низьке завантаження, можуть споруджуватися за спрощеною схемою, оскільки зовнішній вплив на конструкцію буде значно меншим. Наприклад, в якості матеріалу покриття може виступати асфальтова крихта або бюджетний тип асфальту.

Завдяки тому, що сьогодні ціна укладання асфальту досить прийнятна, часто навіть на дорогах з невеликим автомобільним трафіком влаштовується покриття високої якості. Крім того, цим також досягається більш тривалий період експлуатації.

Якісне дорожнє полотно має кілька великих блоків [4]:

– грунтове або земляне підґрунтя;

– дорожня подушка;

– асфальтобетонне покриття.

При цьому фактична кількість технологічних шарів набагато більша, оскільки дорожня подушка і асфальтове покриття є багатошаровими блоками.

В таблиці 1.1 наведені конструктивні шари та матеріали включає дорожнє полотно.

Таблиця 1.1 – Конструктивні шари та матеріали включає дорожнє полотно

Область конструкції дороги	Що використовується в конструкції
Ґрунтове підґрунтя	Підготовлений ґрунт
Дорожня подушка	Геотекстиль; Пісок; Геосітка або георешітка; Щебінь (великі та дрібні фракції); Бітумна емульсія.
Асфальтобетонне покриття	Грубозернистий асфальт; Дрібнозернистий асфальт; Бітумна емульсія; Геосітка (опціонально).

Кожен з матеріалів конструкції виконує свої функції.

Підготовлений і ущільнений ґрунт підвищує міцність і стійкість конструкції. Якщо земляна основа буде пухкою, дорожнє полотно швидко втратить необхідну геометрію, внаслідок чого будуть зруйновані практично всі його технологічні шари.

Геотекстиль, що представляє собою міцне тканe або неткане полотно з синтетичних ниток і волокон, виконує кілька функцій [4]:

– розділення шарів;

– армування;

– фільтрація;

– дренажна функція;

– перешкода проростанню рослин.

Використання геотекстилю істотно підвищує якісні характеристики споруди, а також дозволяє скоротити витрату деяких матеріалів.

Піщаний шар виконує стабілізуючу та амортизуючу функції. Як правило, товщина даного шару становить близько 40 см після ущільнення. Також важливо, щоб піщана подушка була рівною в горизонтальній площині.

Геосітки або георешітки теж відносяться до категорії синтетичних рулонних матеріалів і виконують схожі з геотекстилем функції [4]:

– армуючий ефект;

– розділення шарів;

– утримання щебню від вдавлювання в пісок;

– зниження впливу вертикального навантаження.

Георешітка дозволить скоротити витрату щебню приблизно на 40%, що тягне за собою і економічну вигоду. Комплекс з геотекстилю та георешітки робить дорожнє полотно міцнішим приблизно на 200-250%.

Щебеневий шар дозволяє зробити дорожнє полотно значно міцнішим і довговічнішим, а також виступає в ролі надійної основи для укладання асфальту. Дорожнє полотно включає в себе щебінь різних фракцій: спочатку укладається щебінь великих фракцій, а поверх нього більш дрібні фракції – це дозволяє забезпечити високу щільність.

Кожен шар щебню розрівнюється й ущільнюється після відсипання, а також обробляється бітумною емульсією. Альтернативний варіант – використання «чорного щебню», який представляє готову суміш, до складу якої входить щебінь з гірських порід, змішаний в певних пропорціях з в'яжучою речовиною.

Бітумна емульсія підвищує адгезійні властивості (покращує зчеплення), виступаючи в ролі ґрунтовки, а також підвищує вологоізоляційні показники оброблюваної ділянки.

Асфальтобетонні суміші використовуються для влаштування покриття автомобільних доріг [4]:

– грубозернистий асфальт є підстилаючим шаром, захищаючи елементи основи, сприяючи стабілізації покриття, а також перешкоджаючи утворенню колії;

– дрібнозернистий асфальт має більш високу міцність і зносостійкість, що дозволяє використовувати його для влаштування поверхневого шару, який також називають «шаром зносу». Міцний дрібнозернистий асфальтобетон захищає

більш глибокі конструктивні елементи від зовнішнього впливу, а також перешкоджає проникненню води вглиб конструкції.

Гідроізоляція дорожнього покриття дуже важлива, оскільки при попаданні води всередину асфальтового шару буде спостерігатися його прискорене руйнування. При замерзанні, перетворюючись на лід, вода розширюється, буквально розхитуючи асфальт зсередини. При частих циклах заморозки-розморозки, які характерні для більшості областей України, руйнівний вплив буде посилюватися.

Якісне дорожнє полотно влаштовується з використанням тих різновидів асфальтобетону, які мають досить високі фізико-механічні характеристики. Такі асфальтові суміші мають у складі щебінь з міцних гірських порід, а також забезпечуються спеціальними модифікаторами для підвищення певних характеристик.

Дорожнє полотно повинно бути влаштовано за певною технологією. Нормативні вимоги також поширюються на характеристики матеріалів і необхідність використання певної спецтехніки. Якщо нормативні вимоги дорожнього будівництва були порушені, дорожнє полотно не буде мати достатньо високої якості та терміну служби.

Таким чином, при будівництві автомобільних доріг також необхідно дотримуватися технології дорожнього будівництва, щоб забезпечити досить високі характеристики конструкції. Використання матеріалів високої якості також дозволяє зробити дорожнє полотно міцнішим і надійнішим.

1.3 Найякісніші автомобільні дороги у світі

Якість дорожнього покриття є одним із визначальних індикаторів рівня розвитку транспортної інфраструктури держави. Вона суттєво впливає на безпеку дорожнього руху, комфорт учасників перевезень та економічну ефективність, оскільки належний стан доріг зменшує час доставки вантажів. У цій статті проаналізовано країни з найвищими показниками якості дорожньої

мережі, окреслено ключові чинники, що визначають її стан, а також розглянуто основні типи покриттів, які застосовуються у світовій практиці.

Всесвітній економічний форум (WEF) та інші міжнародні організації щороку становлять рейтинг країн за якістю доріг. Оцінка будується на основі опитувань, аналізу дорожньої інфраструктури та якості покриттів.

Розглянемо країни з найкращими дорогами у світі за даними 2024 року [5].

Система доріг в Сінгапурі вважається однією з найсучасніших та найефективніших. Висока якість покриття, продумана структура дорожніх розв'язок та регулярне обслуговування роблять дороги цієї країни прикладом для наслідування [5].

Дороги в Об'єднаних Арабських Еміратах (ОАЕ) відрізняються високою гладкістю та продуманою інфраструктурою. Тут активно використовуються інноваційні технології, включаючи спеціальні покриття, що знижують нагрівання асфальту [5].

Швейцарія славиться своїми ідеально рівними дорогами, навіть у гірських районах. Велика увага приділяється екологічності матеріалів та стійкості покриттів [5].

Нідерланди активно використовують технології для запобігання руйнуванням покриття через кліматичні умови. Крім того, велодоріжки тут не поступаються якістю автомобільним магістралям [5].

У Гонконгу дороги проектуються з урахуванням високої густоти населення та складного рельєфу. Це забезпечує надійне поєднання всіх районів міста.

Дороги Японії славляться якістю та зносостійкістю. Особлива увага приділяється захисту покриття від землетрусів [5].

В умовах суворого клімату Фінляндії дороги залишаються у відмінному стані завдяки використанню морозостійких матеріалів.

Австрійські автомагістралі та гірські дороги відрізняються надійністю та зручністю. Використовуються спеціальні технології, щоб асфальт витримував перепади температур.

Німецькі автобани славляться не лише відсутністю обмежень швидкості на деяких ділянках, а й своєю якістю. Асфальт розрахований на величезні навантаження та інтенсивний трафік.

Швеція активно впроваджує екологічні та безпечні матеріали, що дозволяє підтримувати дороги на високому рівні.

Рівень якості автомобільних доріг визначається не лише технологіями їхнього будівництва, а й властивостями матеріалів, що застосовуються для влаштування покриття. Розглянемо основні типи дорожніх покриттів, які використовуються в цих країнах.

Асфальтобетон є найбільш поширеним видом дорожнього покриття завдяки своїй довговічності, стійкості до перепадів температур та придатності до локального ремонту. Асфальтобетон широко використовується на автомагістралях, міських дорогах і в зонах паркування [5]..

Бетонні покриття характеризуються високою міцністю та витривалістю під дією інтенсивних навантажень. Такі покриття переважно застосовуються в промислових районах, на територіях аеропортів та на магістральних автодорогах.

Гравійні дороги – поширені переважно у сільській місцевості та на другорядних маршрутах. Це економічний варіант покриття, однак він потребує частого догляду та регулярного профілювання.

Бруківка використовується здебільшого в історичних центрах міст і пішохідних зонах. Бруківка має високі естетичні та експлуатаційні характеристики, проте її укладання є трудомістким і дорогим.

Ґрунтові дороги – це найбільш бюджетний тип покриття, що характерний для віддалених або малонаселених територій. Через вплив погодних умов та рух важкої техніки такі дороги швидко втрачають експлуатаційні властивості.

Екологічні покриття – це сучасний напрям у дорожньому будівництві, який передбачає використання матеріалів, що зменшують вплив на довкілля, зокрема переробленого пластику, гуми або комбінованих екополімерів.

Основними чинниками, що визначають якість дорожнього покриття є:

– кліматичні умови: у регіонах із різкими сезонними коливаннями температур необхідні покриття, стійкі до деформацій і зношування;

– інтенсивність руху: високі транспортні навантаження вимагають використання міцніших матеріалів та технологій;

– фінансування та рівень технологічного розвитку. Країни, що інвестують у сучасні методи будівництва й утримання доріг, забезпечують вищі показники якості дорожньої мережі;

– регулярне обслуговування. Навіть високоякісне покриття потребує своєчасних ремонтних робіт і систематичного догляду.

Якість доріг істотно впливає на ефективність транспортної системи держави. Приклади таких країн, як Сінгапур, ОАЕ та Швейцарія, свідчать, що інвестиції в інфраструктуру забезпечують значний довгостроковий ефект. Використання різних типів дорожніх покриттів дозволяє адаптувати транспортну мережу до кліматичних, географічних та економічних умов, забезпечуючи належний рівень безпеки та комфорту для учасників дорожнього руху [5]..

1.4 Мета, предмет, об’єкт і задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності проєктів дорожнього будівництва за рахунок розробки методу для вибору технології дорожнього покриття за багатьма критеріями.

Об'єкт дослідження – проєкти дорожнього будівництва.

Предмет дослідження – метод TOPSIS для вибору дорожнього покриття за багатьма функціональними та вартісними критеріями.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

− провести аналіз проблеми автомобільно-дорожнього будівництва;

− розробити структурну модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття;

− провести аналіз багатокритеріальних методів прийняття рішень;

− розробити метод вибору дорожнього покриття за багатьма критеріями;

− навести приклад використання розробленого методу вибору дорожнього покриття за багатьма критеріями.

2 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИБОРУ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ В ПРОЄКТАХ ДОРОЖНЬОГО БУДІВНИЦТВА

2.1 Розробка структурної моделі інформаційної технології вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва

У вирішенні проблеми підвищення економічної ефективності будівництва особливе місце належить проєктуванню. Від рівня проєктних рішень значною мірою залежить рівень виробництва, характер життєвого циклу об'єктів будівництва та тривалість їх функціонування, собівартість продукції, умови експлуатації та праці [6].

У сучасній практиці проєктування будівництва автомобільних доріг все більше уваги приділяється розробці комплексних рішень, спрямованих на мінімізацію трудових, матеріальних, фінансових ресурсів, скорочення термінів будівництва при збереженні належного рівня споживчих характеристик дорожнього покриття. Його стан і термін служби безпосередньо залежать від ступеня транспортного навантаження, кліматичних умов району будівництва, дотримання технології його влаштування та будівництва дороги в цілому [7].

Багаторазове збільшення чисельності та вантажопідйомності транспортних засобів призводить до передчасного руйнування верхнього шару покриття автомобільних доріг і тому вимагає від проєктних організацій розробки довговічних та екологічно безпечних протягом усього життєвого циклу покриттів. Від ступеня обґрунтованості застосовуваних проєктних рішень залежить обсяг не тільки бюджетних коштів, але і суспільно необхідних витрат, що виникають при вантажних і пасажирських перевезеннях [7-8].

На сьогоднішній день кількість та якість дорожньої мережі значно відстає від потреб економіки та соціального становища. Якість доріг недостатньо характеризувати тільки придатністю задовольняти перевезення з певними вимогами. При оцінці рівня якості автомобільних доріг з огляду на високу

вартість їх будівництва і тривалі терміни експлуатації необхідно встановлювати всю повноту вимог, що пред'являються до них. Одним з важливих напрямків щодо забезпечення якості автомобільних доріг є застосування дорожньо-будівельних матеріалів, що відповідають рівню транспортних навантажень на дорожнє полотно і забезпечують більшу довговічність і надійність автомобільних доріг. Розвиток напрямку з розробки не тільки нових, але й вдосконалення існуючих матеріалів з метою ефективного використання бюджетних коштів є актуальним [8].

Для підвищення ефективності дорожнього будівництва необхідно впровадження наступних напрямків :

– застосування доступних матеріалів з можливістю вибору найбільш оптимальних рішень;

– формування доступної для всіх учасників дорожньої галузі достовірної інформації про ефективність матеріалів за якісними та кількісними параметрами;

– забезпечення безперешкодного переходу оптимальних матеріалів у статус широко застосовуваних при відповідному підтвердженні їх ефективності.

Сучасні принципи управління та господарювання вимагають подальшого вдосконалення методів оцінки ефективності застосування та вибору сучасних матеріалів у дорожньому господарстві. Застарілі методи прийняття рішення базуються, в основному, на мінімізації ціни матеріалів в одноразових будівельних витратах. Інші показники ефективності матеріалів в дорожньо-будівельних проєктах відводиться другорядна роль. У розділах проєктної документації матеріали для дорожніх одягів обираються або формальними економічними розрахунками, або зовсім без підтвердження їх економічної ефективності, або застосовуваний матеріал, позначений у відповідному розділі проєкту, містить інформацію рекламного характеру з інтернет-ресурсу постачальника.

У дорожньо-будівельних проєктах при виборі матеріалів для конструктивних шарів дорожнього одягу відсутній порівняльний підхід, такий необхідний для вибору оптимального варіанту. Адже питома вага вартості

матеріалів у договірних цінах на будівництво автомобільної дороги становить в середньому близько 70 % [8].

В умовах недостатньої опрацьованості методології оцінки ефективності матеріалів, що будуть використовуватися в дорожньо-будівельних проєктах, важливим є визначення основних факторів і оціночних показників, що впливають на якість дорожнього покриття.

Дорожнє покриття – це найважливіший шар дорожнього одягу, який в результаті експлуатації піддається досить серйозним зовнішнім впливам: навантаженням безпосередньо від проїжджаючого транспорту, атмосферним опадам, температурним змінам, що протікають у часі, заморожуванню і відтаванню. Саме дорожнє покриття забезпечує необхідні техніко-експлуатаційні якості автомобільної дороги (дорожня міцність, швидкість руху, безпека використання тощо), а також термін її служби.

Для влаштування верхнього шару покриття автомобільних доріг необхідно провести заходи для зниження їх вартості за рахунок застосування вторинних матеріалів, матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями; збільшення міжремонтних термінів; підвищення довговічності шарів покриття автомобільних доріг. Поставлені цілі можуть бути досягнуті на стадії розробки проєктної документації при проведенні аналізу порівняльних варіантів прийнятних видів покриття. При призначенні видів покриття для влаштування верхнього шару покриття слід керуватися положеннями чинних стандартів і норм на дорожньо-будівельні матеріали та вироби і нормами проєктування автомобільних доріг[6, 8].

Структурна модель інформаційної технології вибору технології дорожнього покриття представлені на рисунку 2.1.

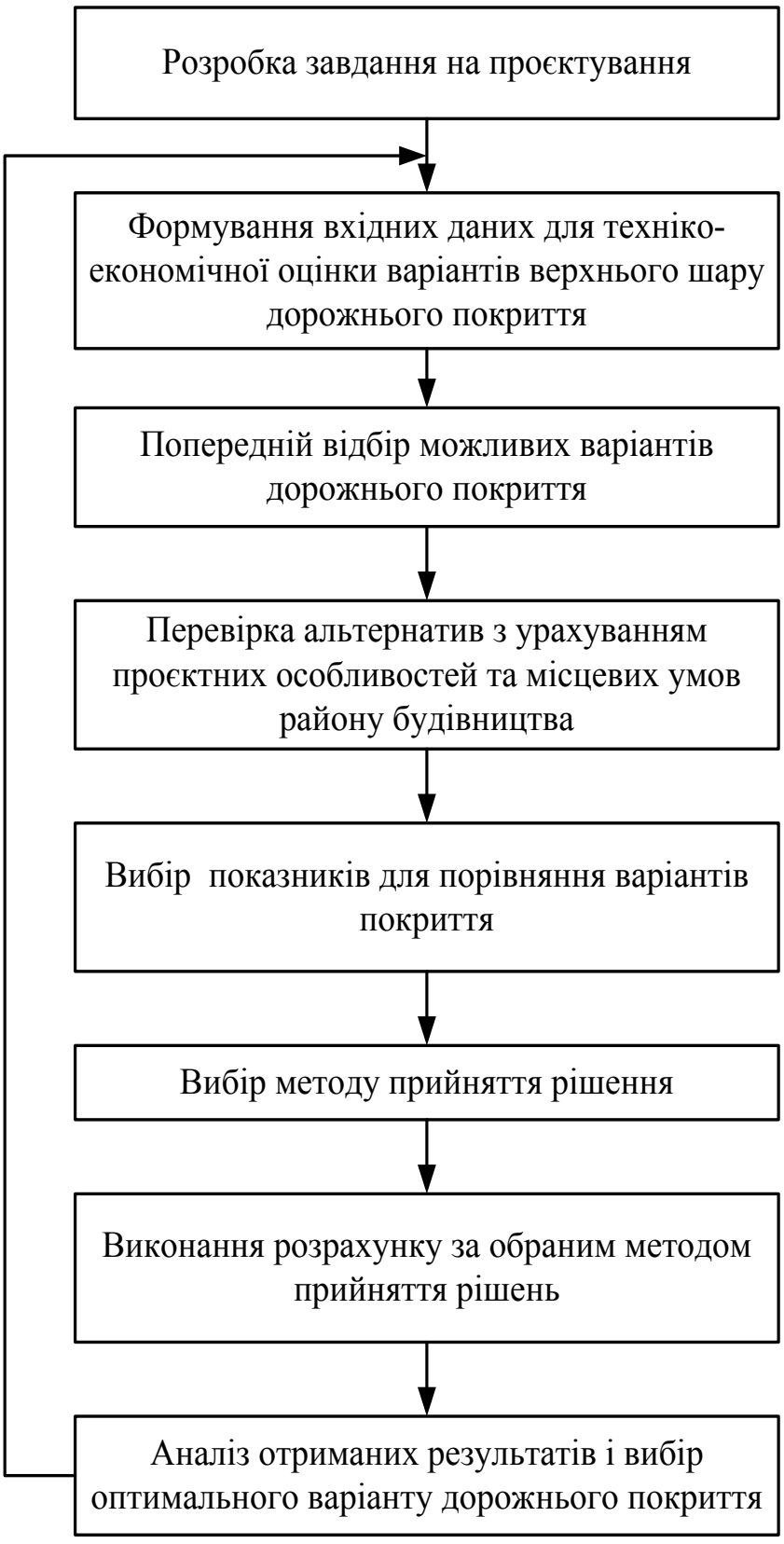


Рисунок 2.1 – Структурна модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва

Всі варіанти дорожнього покриття – альтернативи повинні відповідати всім вимогам:

– забезпечення вимог завдання на проектування;

– забезпечення безпеки руху, транспортно-експлуатаційним вимогам, що пред'являються до дороги відповідної категорії і очікуваним у перспективі складу та інтенсивності руху з урахуванням зміни інтенсивності руху протягом заданих міжремонтних термінів і передбачуваних умов ремонту та утримання;

– дотримання встановлених термінів будівництва;

– дотримання екологічної безпеки.

При виборі альтернатив дорожнього покриття враховано їх відповідність проєктним навантаженням і показникам водо-, морозо- і термостійкості [6-8].

Варіанти відрізняються видами матеріалів, їх виробництвом, технологією влаштування покриття та стратегією його експлуатації (періодичністю проведення ремонтів та утримання) протягом розрахункового періоду.

При проєктуванні варіантів дорожніх покриттів завжди слід враховувати забезпеченість району будівництва дорожньо-будівельними матеріалами, необхідними для реалізації проєктного рішення.

Найпоширенішим матеріалом, що застосовується при влаштуванні дорожнього покриття в Україні, є асфальтобетонна суміш, що готується відповідно до вимог стандарту. До переваг таких покриттів відносять безпильність при русі автомобілів, малий знос покриттів, можливість застосування в різних кліматичних зонах, відносно невисоку вартість їх влаштування, утримання та ремонтів, до недоліків – підвищену слизькість при зволоженні та передчасне руйнування в експлуатації. Невеликий термін служби обумовлюється утворенням хвиль, зсувів внаслідок недостатньої міцності або надмірної пластичності, тріщин внаслідок надмірної крихкості і лущення в результаті недостатньої водостійкості.

Асфальтобетонні суміші розрізняються складом компонентів і основними фізико-механічними показниками. Основу асфальтобетонної суміші складають гравій (або щебінь), пісок, мінеральний порошок, бітумне в'яжуче в оптимальних

пропорціях. Кожен компонент допомагає надати асфальтобетону певні властивості, що визначають його призначення та умови експлуатації. Його міцнісні характеристики визначаються процентним співвідношенням складових асфальтобетонної суміші. Вибір суміші здійснюється, в основному, залежно від властивостей вихідних матеріалів, характеру автомобільного руху і кліматичних умов місцевості, що є визначальною умовою будівництва довговічних цих покриттів. Виходячи з величини терміну служби розраховують конструктивні параметри дорожніх одягів.

Асфальтобетонне покриття повинно бути, як правило, одношаровим.

В даний час, незважаючи на популярність будівництва автомобільних доріг з асфальтобетонним покриттям, реалізуються проєкти дорожнього одягу з влаштуванням цементобетонного покриття.

Асфальтобетонні покриття мають як переваги перед цементобетонними покриттями, так і недоліки. Цементобетон не вимагає влаштування надміцних дорожніх одягів. У цього покриття інші, ніж у асфальтового покриття, характеристики поверхні: вищий коефіцієнт зчеплення з колесами автомобілів, підвищена зносостійкість, менше колійне утворення і, відповідно, підвищені міжремонтні терміни. При дотриманні технології укладання забезпечується хороша рівність поверхні, як поздовжня, так і поперечна, тим самим забезпечується висока плавність і комфорт при русі транспортних засобів, ніж при «гнучкому» асфальтобетоні.

Розрахунковий термін служби між капітальними ремонтами для жорстких дорожніх одягів з цементобетонним покриттям повинен бути не менше 25 років, між ремонтами – не менше 12 років. Насправді термін служби цементобетону може досягати 40–50 років і тим самим в 3 і більше разів перевищувати життєвий цикл асфальтобетонних доріг [6-8].

При використанні цементобетонного покриття замість асфальтобетонного кошторис на експлуатаційні витрати скорочується на 30 % на рік.

Зниженню дорожньо-транспортних пригод сприяє те, що в темний час доби на такій дорозі краща видимість через більший світловідбиваючий ефект

матеріалу покриття. У асфальтобетонного покриття засліплення водіїв може відбуватися у зв'язку з відбитим світлом фар від поверхні води, що заповнює нерівності. Також до недоліків цементобетонного покриття слід віднести: шум, що виникає (при їзді по цементобетонній дорозі шум дещо вищий (від 2 до 4 дБ), оскільки більш пористий і пластичний асфальтобетон краще поглинає шуми); неможливість відкриття руху відразу після закінчення будівництва цементобетонного покриття, а при висоті насипу більше 1,5 м його будівництво починають тільки на другий рік; процес ремонту цього покриття складніший, ніж у асфальтових покриттів [6-8].

Для досягнення високої якості будівництва дорожнього покриття необхідний достатній рівень фінансування проєктних робіт; прискорена розробка і швидке освоєння нових видів продукції, робіт, послуг; зниження цін на них. Проєктоване покриття автомобільної дороги повинно бути не тільки міцним і надійним в експлуатації, екологічним, але й економічним, менш матеріаломістким, особливо за витратою дефіцитних матеріалів.

2.2 Економічне обґрунтування вибору варіанту конструкцій дорожнього одягу

Динамічне зростання інтенсивності руху на автомобільних дорогах загального користування та підвищення осьових навантажень транспортних засобів, що спостерігається в Україні протягом останнього десятиліття, зумовлює необхідність постійного розвитку дорожньої мережі та вдосконалення конструкцій дорожніх одягів. Невідповідність технічного стану доріг сучасним вимогам транспортного потоку призводить до зниження середньої швидкості руху, підвищеного зношування транспортних засобів і збільшення витрат на їх утримання, зростання споживання палива, а також до погіршення рівня дорожньої безпеки та збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод [9].

Сучасні конструкції автомобільних доріг та технології їхнього зведення ґрунтуються переважно на двох альтернативних і конкурентних типах

дорожнього покриття – асфальтобетонному та цементобетонному. Значне скорочення строків експлуатації асфальтобетонних покриттів, спричинене інтенсивним зростанням транспортних потоків на основних магістралях, актуалізує потребу в пошуку ефективних альтернатив традиційним асфальтобетонним конструкціям. Одним із перспективних рішень є будівництво автомобільних доріг із жорстким (цементобетонним) покриттям [9].

Для обґрунтування вибору оптимального типу дорожнього одягу під час проєктування автомобільних доріг розглянемо проведено економічне порівняння кількох варіантів конструктивних рішень.

Дорожні одяги, незалежно від їх типу, мають проєктуватися з урахуванням складу транспортного потоку, прогнозної інтенсивності руху на весь період експлуатації, а також ґрунтових, гідрогеологічних та природно-кліматичних умов. Конструкцію дорожнього одягу нежорсткого типу (асфальтобетонного) формують із обов’язковим врахуванням показників надійності та довговічності всієї системи.

Конструювання та розрахунок дорожнього одягу нежорсткого типу виконаний згідно з ВБН В.2.3-218-186 [10].

Проєктування дорожнього одягу жорсткого типу (цементобетон) виконане згідно з ВБН В.2.3-218-008 [11]. У розрахунковій частині визначаються нормативні та розрахункові навантаження, а також параметри основних конструктивних елементів дорожнього одягу – товщина й довжина плит, товщина шарів основи, схема армування плит і шарів, відстань між температурно-усадковими швами. Розрахунки виконуються для різних типів покриття, категорій доріг, а також для будь-яких значень транспортних навантажень, ґрунтових та природно-кліматичних умов.

При виборі варіантів конструкції дорожніх одягів необхідно враховувати інтенсивність дорожнього руху.

Розрахований альтернативний варіант дорожнього одягу для нежорсткого типу з урахуванням вимог ВБН В.2.3-218-186 представлено на рисунку 2.2.

Рисунок 2.2 – Конструкція дорожнього одягу нежорсткого типу [9]

Розрахований альтернативний варіант для дорожнього одягу жорсткого типу з урахуванням вимог ВБН В.2.3-218-008 представлено на рисунку 2.3.

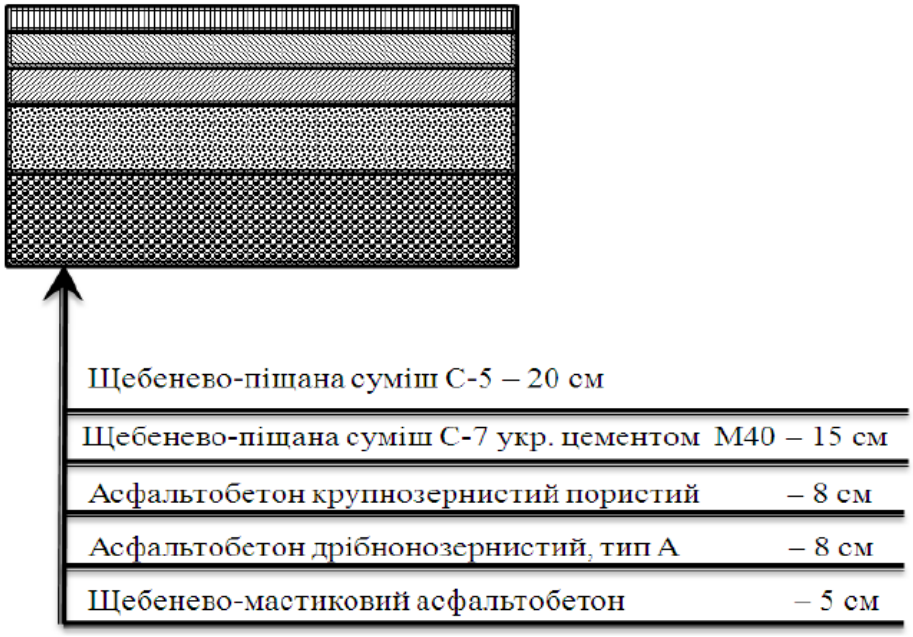


Рисунок 2.3 – Конструкція дорожнього одягу жорсткого типу [9]

Оцінювання ефективності різних варіантів конструкцій дорожніх одягів можна здійснити шляхом порівняння трудових та матеріально-технічних витрат, що виникають протягом усього порівняльного періоду (Т). Альтернативні конструктивні рішення відрізняються за типом дорожнього одягу та підходами до організації його експлуатаційного утримання впродовж строку Т, при цьому враховано специфіку утримання жорстких і нежорстких дорожніх конструкцій.

Розрахунок оцінку ефективності будівництва й експлуатації дорожніх одягів здійснено на 1 погонний кілометр автомобільної дороги визначеної категорії з урахуванням її параметрів та умов функціонування [9].

В якості критерію порівняльної ефективності використано мінімальне значення інтегральних витрат ($B_{заг}$), що включають:

– витрати на нове будівництво дорожнього одягу;

– витрати на капітальні та поточні ремонти;

– витрати на експлуатаційне утримання:

Розрахунок виконано для *і*-го року, починаючи з року, наступного після початку будівництва, із застосуванням безризикової норми дисконту (*E*) (у відносних одиницях).

Для порівняння витрат на нове будівництво, ремонт та експлуатаційне утримання дорожніх одягів різних типів використано таку формулу [9]:

$$B_{заг} = B_{буд} + B_{КР}\left(1+E\right)^t + \sum_{i=1}^{n}\left[\left(B_{ПС}\left(1+E\right)^t n\right)\right] + \sum_{i=1}^{m}\left[\left(B_{ПД}\left(1+E\right)^t m\right)\right] + \sum B_{СЕ}^{P}\left(1+E\right)^t,$$

де $B_{буд}$ – вартість нового будівництва 1 км дорожнього одягу;

$B_{КР}$ – витрати на капітальний ремонт дорожнього одягу;

$B_{ПС}$ – витрати на поточні середні ремонти дорожнього одягу;

n – кількість поточних середніх ремонтів, які виконуються на протязі порівняльного строку *Т*;

$B_{ПД}$ – витрати на поточний дрібний ремонт та експлуатаційне утримання дорожнього одягу;

B_{CE}^{P} – втрати користувачів доріг при виконанні ремонтних робіт;

m – кількість років експлуатаційного утримання дорожнього одягу автомобільної дороги за обраним варіантом виконання робіт;

E – безризикова норма дисконту у відносних одиницях виміру;

$(1+E)$ – коефіцієнт дисконтування витрат.

У роботі [7] проведено економічне обґрунтування вибору типу дорожнього одягу з урахуванням усереднених цін на матеріали станом на ІІІ квартал 2016 року. Економічно доцільнішим виявилося будівництво цементобетонних покриттів: на кінець розрахункового періоду економія становила близько 45 %.

За умов зниження вартості асфальтобетонної суміші на 35 % перевага цементобетонних покриттів проявляється лише з 12-го року експлуатації, проте до кінця розрахункового періоду економія все одно складає близько 30 %. У разі підвищення вартості бетонної суміші на 30 % будівництво цементобетонних доріг стає дорожчим у порівнянні з асфальтобетонними, однак загальна економія все одно забезпечується за рахунок нижчих витрат на ремонти та експлуатаційне утримання.

Вартість будівництва будь-якого типу дорожнього одягу значною мірою залежить від цін на будівельні матеріали та частки використання місцевих ресурсів. У довгостроковій перспективі (10–20 років) доцільнішим є застосування цементобетонних покриттів, оскільки вони здатні витримувати більші навантаження, що забезпечує додаткову соціально-економічну ефективність.

З огляду на прив’язку вартості бітуму до коливань курсу іноземних валют, у таких умовах оптимальним рішенням є використання цементу.

При виборі типу конструкції дорожнього одягу в кожному конкретному випадку необхідно проводити передпроєктне техніко-економічне порівняння, яке дозволяє обґрунтовано оцінити ефективність застосування того чи іншого варіанту конструкції.

3 БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

3.1 Методи багатокритеріального аналізу

Прийняття рішень у дорожньому будівництві є складним і часто неструктурованим процесом, який спирається на розрізнені докази та оціночні судження. Велика кількість і доступність розрізнених і часом неоднозначних факторів не сприяє полегшенню процесу прийняття рішення [12]. Таким чином, видається необхідним упорядкований облік впливу тих чи інших факторів на процес прийняття рішення.

В області оцінки технологій дорожнього будівництва (ТДБ) традиційно домінує аналіз співвідношення витрат і ефективності (cost-effectiveness analysis) як головний аргумент, що використовується при прийнятті рішення. Однак в останні кілька років в області ТДБ відбувся підйом інтересу до використання аналізу на основі більшої кількості критеріїв, або багатокритеріального аналізу (БКА), як інструменту підтримки прийняття рішень. В якості таких критеріїв можуть використовуватися коефіцієнт зчеплення (тертя), кліматичні умови (температура), час, що витрачена на будівництво, фінансові витрати, ремонт, а також деякі інші [12].

Таким чином, БКА може бути визначений як інструмент, що підтримує і полегшує процес прийняття рішень, як підхід, заснований на використанні декількох критеріїв і забезпечує вибір тієї чи іншої альтернативи. Застосування БКА в технології дорожнього будівництва забезпечує об'єктивність і прозорість оцінки прийнятності різних варіантів рішень [13].

БКА доцільно використовувати в таких ситуаціях:

– порівняння декількох варіантів рішення при аналізі, в результаті якого необхідно визначити можливі як найбільш прийнятні, так і неприйнятні варіанти рішень;

– порівняння варіантів рішень при наявності декількох, іноді суперечливих критеріїв;

– необхідність досягнення компромісного рішення в ситуації, коли різні зацікавлені сторони мають суперечливі цілі або цінності [14].

Можна виділити наступні переваги БКА як інструменту прийняття рішень перед традиційними інструментами прийняття рішення, які широко використовуються в даний час при проектуванні складних технічних систем, такими як співвідношення «витрати – ефективність», аналіз впливу на бюджет тощо [14]:

– БКА дозволяє знаходити оптимальне рішення в умовах надмірної кількості невпорядкованих аргументів для прийняття рішення;

– забезпечує послідовний і відтворюваний процес прийняття рішень шляхом використання єдиного підходу в різних контекстах прийняття рішень. Відтворюваність процесу прийняття рішення передбачає, що на підставі певного набору ознак різні групи осіб, які приймають рішення (ОПР), або ті ж самі ОПР на іншому рівні прийняття рішення, враховуючи одну і ту ж інформацію, прийняли б те саме рішення;

– забезпечує більш прозорий процес прийняття рішень, оскільки на будь-якому з рівнів прийняття рішення зовнішнім спостерігачам доступний набір використовуваних критеріїв та їх значень. Прозорість прийняття рішення передбачає, що докази та інші фактори, які були взяті до уваги, а також процес прийняття рішень є зрозумілими для зовнішніх спостерігачів [14, 15].

На даний час розроблено два види багатокритеріального аналізу рішень: якісний і кількісний.

Якісний БКА використовує тільки дорадчий процес для прийняття рішень на основі врахування багатьох критеріїв. Якісний підхід може розглядати альтернативні варіанти рішень, проте сам процес прийняття рішення не є

формалізованим, і вплив критеріїв на вироблення рішення залишається в основному неочевидним. Потенційна критика цього підходу полягає в тому, що процес прийняття рішень не є прозорим і, ймовірно, навряд чи буде відтворюваним. При цьому врахування безлічі різнорідних факторів не підпорядковане заздалегідь визначеному алгоритму, і процес прийняття рішення все ж як і раніше носить суб'єктивний характер [14-15].

Кількісний БКА дозволяє розробити формалізований інструмент підтримки прийняття рішення (тобто ранжування альтернатив або віднесення альтернатив до тієї чи іншої категорії) на основі попередньої оцінки відносної важливості різних критеріїв (вагових коефіцієнтів критеріїв) і з урахуванням їх значень, також виражених кількісно. Розробка методики кількісного БКА для вирішення конкретного завдання включає в себе наступні компоненти:

1) визначення набору критеріїв, які потім об'єднуються в єдину математичну функцію,

2) вектора вагових коефіцієнтів для обраних критеріїв,

3) шкал для вимірювання значень кожного з критеріїв,

4) методу віднесення отриманої для кожного варіанту рішення оцінки до відповідного рівня пріоритетності (у разі необхідності) [14-15].

Кількісні методи БКА розрізняються способами обчислення відносних ваг критеріїв і числових значень критеріїв, які потім використовуються для прийняття рішення. Існує кілька кількісних методів МКА: елементарні моделі, моделі вимірювання цінності, моделі переваги і моделі референсного рівня.

Елементарні моделі – це група методів (максимін, максимакс, метод Гурвіца тощо), які вимагають врахування часткових суб'єктивних переваг у рамках процесу прийняття рішень. Ці методи прості, швидко та відносно легко реалізуються як у розробці, так і в застосуванні, вони не вимагають складних математичних навичок у дослідника, передбачають проведення аналізу чутливості, проте варто зазначити, що даний метод ніколи не застосовувався в області технологій дорожнього будівництва [14-15].

Інша група моделей – моделі вимірювання цінності, до них відносяться проста лінійна адитивна модель, аналітична ієрархічна модель. Ці методи дозволяють вибирати альтернативу шляхом порівняння підсумкових оцінок різних альтернатив. При цьому спочатку проставляються оцінки за кожним критерієм, а потім за ними обчислюється функція для кожної з альтернатив, що підлягають аналізу. Це найбільш популярна група методів БКА, зокрема. в області ТДБ. Ці методи є інтуїтивно зрозумілими і простими в реалізації. Слід зауважити, однак, що в даній групі методів існує небезпека компенсаційного ефекту: низький внесок одного критерію може бути компенсований високим внеском іншого критерію [14-15].

Компенсаційний ефект у цьому випадку може виникнути, якщо альтернатива, яка має дуже високі показники критерію ефективності та низькі показники критерію безпеки, буде кращою порівняно з іншою, яка має нижчі, проте достатні показники за критерієм ефективності та прийнятні показники безпеки на основі сумарного балу. Такий результат може бути не оптимальним, оскільки негативний вплив небажаних явищ на об'єкт в цілому не буде в достатній мірі враховуватися [14-15].

У моделях переваги спочатку попарно порівнюються альтернативи за кожним з критеріїв окремо, і визначається ступінь (величина) переваги однієї альтернативи перед іншими. Потім ця інформація об'єднується за всіма критеріями для кожної з аналізованих альтернатив і обчислюється величина переваги кожної альтернативи над іншими. Таким чином, найбільш переважною буде визнана альтернатива з найбільшою величиною переваги [14-15].

У моделях референсного рівня здійснюється вибір альтернатив, які знаходяться найближче до досягнення заздалегідь визначеного бажаного або прийнятного значення [15].

Таким чином, кількісний підхід забезпечує прозорість процесу прийняття рішення, тобто незалежність рішень від складності наданих доказів, а також прозорість у плані ясності процесу для інших зацікавлених сторін. Крім того, кількісний підхід забезпечує узгодженість між різними рівнями прийняття

рішень в силу того, що всі критерії, на підставі яких приймається рішення, є кількісними.

Однак у групи кількісних методів БКА також є слабкі сторони, а саме: ці підходи є досить жорсткими і не сприяють дискусії через фіксовану кількість критеріїв та їх значень, на основі яких приймається рішення. Крім того, використання одного з кількісних підходів може призвести до збільшення потреби у фактичних даних та доказовій базі для кожної з альтернатив.

Водночас якісний підхід до БКА дозволяє використовувати більше можливостей для формування рекомендацій завдяки використанню ширшого (необмеженого) набору критеріїв і нефіксованого набору їх значень, а також дозволяє застосовувати специфічні критерії для кожного конкретного випадку. Недоліками якісного підходу є те, що рішення можуть бути недостатньо узгодженими як між різними рівнями прийняття рішень, так і всередині кожного рівня. У порівнянні з групою кількісних методів при використанні якісного підходу нижча прозорість і відтворюваність процесу прийняття рішення через складність розуміння аргументації прийнятих рішень особами, які знаходяться поза процесом [14-15].

Різні види методів БКА, маючи свої переваги та недоліки, забезпечують максимальне охоплення інструментів прийняття рішень у різних напрямках ТДБ і при правильному застосуванні значно підвищують об'єктивність прийнятих рішень.

3.2 Загальна постановка задачі прийняття рішення

Процес прийняття рішень щодо вибору дорожнього покриття пов'язаний з оцінкою великої кількості факторів і розглядом множини альтернатив, тому його можна визначити як складний інтелектуальний процес, метою якого є вибір оптимального дорожнього покриття на основі різних критеріїв, що визначаються особою, яка приймає рішення.

Розглянемо загальну постановку задачі прийняття рішення.

Відомо множина альтернатив дорожнього покриття для обраної ділянки дороги $X = \{X_i\}, \left(i = \overline{1,m}\right)$, множина техніко-економічних критеріїв $K = \left\{K_j\right\}, \left(j = \overline{1,n}\right)$.

Оцінки всіх альтернатива за кожним критерієм представлені у вигляді матриці

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}, \left(i = \overline{1,m}; j = \overline{1,n}\right).$$

Необхідно обрати найкраще рішення за всіма критеріями.

Основною складністю у виборі однієї з альтернатив є те, що критерії оцінки часто конфліктують між собою, що в більшості випадків унеможливлює вибір рішення, яке перевершує всі інші за кожним з критеріїв [14]. Тому для прийняття рішення ОПР використовують один або комбінацію з декількох багатокритеріальних методів прийняття рішення.

Досвід застосування та створення багатокритеріальних методів прийняття рішень дозволив накопичити великий обсяг різних моделей, підходів і цілих сімейств методів [15].

Розглянемо дин з найбільш поширених на практиці багатокритеріальний метод прийняття рішень.

3.3 Метод TOPSIS

Основний принцип роботи TOPSIS полягає у вимірюванні схожості альтернатив з ідеальним рішенням, віддаленості від найгіршого рішення і подальшому ранжуванні з урахуванням ваг використовуваних критеріїв [16].

Метод TOPSIS був вперше застосований Yoon & Hwang у 1995 і надав більш конкретний підхід до проблем багатокритеріального прийняття рішення. Цей метод використовує визначення позитивного ідеального рішення та намагається вибрати найкращий варіант з точки зору наближеності значення до цього ідеального рішення. Пізніше метод був модифікований різними способами, щоб краще відповідати реальним проблемам прийняття рішень.

Він схожий на метод компромісного рейтингу за багатьма критеріями, але процедури відрізняються з точки зору порівняння ідеальних рішень [16]. Розглянемо алгоритм методу TOPSIS.

Крок 1. Нормалізація матриці рішень

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}, \left(i = \overline{1,m};\ j = \overline{1,n}\right) \tag{3.1}$$

Крок 2. Знаходження зваженої нормалізованої матриці: кожне значення множиться на відповідний коефіцієнт ваги критерію для отримання матриці, позначеної

$$V_i = \sum_{j=1}^{n} w_j r_{ij};\left(i = \overline{1,m}\right), \quad \sum_{j=1}^{n} w_j = 1. \tag{3.2}$$

Крок 3. Обчислення позитивних (ПІР) та негативних (НІР) ідеальних рішень:

$$A^+ = \left\{v_1^+; v_2^+; ..., v_m^+\right\}, \quad A^- = \left\{v_1^-; v_2^-; ..., v_m^-\right\} \tag{3.3}$$

Крок 4. Розраховуються відстані кожної альтернативи від ПІР та НІР:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^+\right)^2}, \quad d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \tag{3.4}$$

Крок 5. Розрахунок близькості кожної альтернативи та ранжування:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, \left(i = \overline{1,m}\right) \tag{3.5}$$

3.4 Агрегування думок для ухвалення групового рішення методом TOPSIS

Відомо множина альтернатив $X = \{X_i\}; \quad \left(i = \overline{1,n}\right)$ та множина критеріїв $C = \{C_j\}; \quad \left(j = \overline{1,m}\right)$. В прийнятті рішення приймає участь *K* експертів.

Тоді маємо *k*=1,2,…, *K* матриць оцінок (рішень) для кожного експерта, в якій u_{ij}^k – оцінка (корисність) *i*-тої альтернативи за *j*-тим критерієм у матриці оцінок *k*-го експерта. У результаті маємо $U = \left(u_{ij}^k\right)_{n\times m}$.

Для базового методу TOPSIS ваги важливості критеріїв w_j^k для *k*-го експерта є вхідними даними, тобто повинні бути попередньо визначені, при цьому для кожного експерта також має виконуватися умова нормування

$$\sum_{j=1}^{m} w_j^k = 1. \tag{3.6}$$

Для методу TOPSIS для групи експертів складається з аналогічних кроків 1-3, які обчислюються для кожного експерта окремо. Після обчислення відстані до ідеального d_{ik}^+ та негативного рішення d_{ik}^- для кожного *k*-го експерту, обчислюється агрегованої відстані до ідеального та негативного рішення для всіх експертів в цілому за кожною альтернативою за формулою

$$\overline{d}_i^{+} = \left[\prod_{k=1}^{K} d_{ik}^{+} \right]^{1/K}, \left(i = \overline{1,m} \right); \tag{3.7}$$

$$\overline{d}_i^{-} = \left[\prod_{k=1}^{K} d_{ik}^{-} \right]^{1/K}, \left(i = \overline{1,m} \right). \tag{3.8}$$

Крок 5. Розрахунок близькості кожної альтернативи та ранжування альтернатів відбувається відповідно базовому алгоритму методу TOPSIS.

TOPSIS використовується для порівняння схем прийняття рішень щодо вертикальної передачі [17]. Він також використовується як розширення для вирішення різних проблем, як у [18], де використовується теорія нечітких множин, а *k*-вимірна альтернативна множина зводиться до 2-вимірної цілі. В роботі [19-20] автори також розширює TOPSIS на нечітке середовище та використовує нечіткі ідеальні рішення для порівняння альтернативних рішень.

Основними перевагами методу TOPSIS:

– можливість вирішення завдань з нескінченною кількістю альтернатив;

– метод дозволяє вибирати оптимальне рішення, враховуючи два критерії: «як можна ближче до ПІР» і «як можна далі від НІР»;

– стійкість результатів до зміни уподобань;

– результат підходу стійкий до зміни уподобань у певному діапазоні;

– метод має потенціал для вдосконалення та пристосування до вирішення конкретного завдання;

– метод може бути модифікований і доповнений, що робить його більш дієвим інструментом вивчення складних явищ і процесів.

Відзначаються такі слабкі сторони методу TOPSIS [20]:

– потрібна незалежність критеріїв, яку важко гарантувати;

– може призводити до упередженого ранжування;

– можуть виникати ситуації, коли не існує альтернативи, одночасно віддаленої від негативного і близької до позитивного ідеального рішення.

Метод TOPSIS, який є потужним інструментом для прийняття рішень у багатокритеріальних задачах. Завдяки своїй простоті, гнучкості та наочності, він

знаходить широке застосування в різних галузях. З його допомогою фахівці можуть приймати більш обґрунтовані та раціональні рішення, що сприяє підвищенню ефективності та якості дорожнього покриття [21].

Таким чином, для розв’язання поставленого завдання будемо використовувати метод TOPSIS.

4 ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ МЕТОДУ TOPSIS

На сьогодні під час порівняння альтернативних варіантів конструкцій нежорсткого дорожнього одягу як основний критерій аналізу переважно використовується кошторисна вартість. Такий підхід не забезпечує об’єктивної оцінки варіантів, оскільки не враховує перспективну довговічність конструкції, її експлуатаційні характеристики, а також вплив на навколишнє природне середовище.

Водночас результати проведеного аналізу свідчать, що в багатьох країнах дедалі ширше застосовується комплексний підхід до оцінювання, заснований на сучасній концепції потрійного критерію (Triple Bottom Line), яка охоплює економічні, екологічні та соціальні аспекти. У зв’язку з цим актуальним є дослідження можливостей використання методів системного аналізу для вибору оптимального варіанта конструкції нежорсткого дорожнього одягу із залученням відповідного математичного апарату системного підходу.

На етапі аналізу альтернативних варіантів нежорсткого дорожнього покриття як основний показник порівняння, як правило, використовується економічний критерій, зокрема приведена вартість одного квадратного метра покриття. Водночас такий підхід не відповідає сучасній концепції потрійного критерію (TBL – Triple Bottom Line,), відповідно до якої під час розроблення технічних рішень доцільно враховувати не лише економічні, але й енергетичні та екологічні показники.

Застосування зазначеного підходу забезпечує більш об’єктивну оцінку переваг і недоліків конкретних технічних рішень, оскільки дає змогу врахувати можливі зміни економічних витрат, зумовлені варіаціями енергетичних затрат, а також імовірні витрати, пов’язані з усуненням негативного впливу на навколишнє природне середовище.

У контексті концепції TBL особливої актуальності набуває вибір технології дорожнього покриття, зокрема під час розгляду питань повторного використання дьогтьомістких або бітумомістких матеріалів існуючих конструкцій, упровадження енергозберігаючих технологій (гарячого та холодного ресайклінгу), а також застосування енергозберігаючих добавок.

За результатом пошукових досліджень для виконання комплексного аналізу варіантів технологій дорожнього покриття застосувати мето TOPSIS для групи експертів.

Метод простий у використанні та програмній реалізації, а кількість кроків залишається незмінною незалежно від кількості атрибутів [22]. Результати, отримані даним методом, залишаються стійкими при додаванні нових альтернатив, а вхідні дані не потрібно перетворювати перед використанням [22]

Розглянемо приклад вибору технології дорожнього покриття за допомогою методу TOPSIS для групи експертів.

Конструкція дорожнього покриття складається з наступних шарів [22]:

– асфальтобетонне покриття товщиною 5 см;

– верхній шар основи з асфальтобетону товщиною 5 см;

– чорний щебінь товщиною 10 см;

– щебенево-піщана суміш товщиною до 15 см;

– пісок товщиною до 15 см;

– ґрунт земляного полотна (суглинок важкий пилуватий).

Вихідні умови проєктування:

– категорія автомобільної дороги – І-б;

– покриття – ЩМА-15 на БМПА 60/90-53 ;

– розрахункове осьове навантаження – 115 кН;

– потрібний модуль пружності – 280 МПа.

Проведено інструментальне обстеження. Встановлено, що фактичний модуль пружності становить 160 МПа. Відомо, що мінімальний модуль пружності для доріг І-б категорії повинен становити 250 МПа. Можна зробити висновки про необхідність проведення ремонту дорожнього покриття.

Після фрезерування існуючого дорожнього покриття на глибину 10 см встановлено, що модуль пружності основи становить близько 90 МПа, а при фрезеруванні на глибину 20 см – 75 МПа [22].

Розроблено два варіанта ремонту дорожнього одягу за традиційним та альтернативним підходом для автомобільної дороги з покриттям одягу капітального типу.

Альтернатива 1.

Буде проведено фрезерування асфальтобетонних шарів на глибину до 10 см з подальшим виготовленням МДХР.КВ.Кз.М20 – ДСТУ 8976 за технологією холодного ресайклингу «в установці» з додаванням нового матеріалу (40 % за масою) з використанням комплексного в'яжучого (рисунок 4.1) [22].

Рисунок 4.1 – Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (альтернатива 1) [22]

1. ЩМА-15 згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2015 на БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ Б В.2.7‑313:2016 – 5 см.

Підґрунтовка – ЕКШМ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 – 0,4 л/м^2.

2. Асфальтобетон.АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І.БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ 8959:2019 – 10 см.

3. Асфальтобетон. АСГ.Кр.П.А-Б.НП.І.БНД 70/100 згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011 – 10 см.

Підґрунтовка – ЕКШ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 – 0,4 л/м^2;

4. МДХР.КВ.Кз.М20 – ДСТУ 8976 матеріал дорожній, виготовлений за технологією холодного ресайклингу за технологією «в установці» з додаванням нового матеріалу (50 % за масою) з використанням мінерального в’яжучого – 0,18 см.

5. Основа дорожнього одягу (після фрезерування на глибину 10 см).

Приведена кошторисна вартість робіт у розрахунку на один квадратний метр становить 2 906 грн. Енергетичні витрати зменшуються за рахунок скорочення обсягів транспортування нового кам’яного матеріалу, що зумовлено повторним використанням асфальтобетонної крихти в обсязі до 20 %.

Унаслідок посилення основи шляхом улаштування шарів із МДХР та пористого асфальтобетону суттєво підвищується довговічність конструкції, яка, за експертною оцінкою, становить близько 24 років. Це, своєю чергою, дає змогу знизити енергетичні витрати під час подальшого капітального ремонту орієнтовно на 10 %.

Екологічні ризики також зменшуються завдяки використанню бітумомінерального матеріалу при виготовленні МДХР, що мінімізує ймовірність потрапляння продуктів старіння бітуму до ґрунтових вод (близько 20 %).

Альтернатива 2

Пропонується провести фрезерування асфальтобетонних шарів на глибину 5 см з подальшим влаштуванням шару з ЩПС40 укріпленою цементом до марки М20 згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3‑39:2016 (рисунок 4.2).

Рисунок 4.2 – Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (альтернатива 2) [22]

1. ЩМА-15 згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2015 на БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ Б В.2.7‑313:2016 – 5 см.

Підґрунтовка — ЕКШМ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 – 0,4 л/м^2.

2. Асфальтобетон.АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І.БМКП 60/90-65 згідно з ДСТУ 8959:2019 – 10 см.

3. Асфальтобетон. АСГ.Кр.П.А-Б.НП.І.БНД 70/100 згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011 – 10 см.

Підґрунтовка – ЕКШ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 – 0,4 л/м^2.

4. ЩПС40 укріпленою цементом до марки М20 згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-39:2016 за технологією «в установці» – 0,18 см.

5. Основа дорожнього одягу (після фрезерування на глибину 5 см).

Приведена кошторисна вартість у розрахунку на один квадратний метр становить 3 020 грн. Енергетичні витрати зменшуються за рахунок меншої глибини фрезерування, що забезпечує їх скорочення орієнтовно на 5 %.

Завдяки посиленню основи шляхом улаштування шарів зі щебенево-піщаної суміші, укріпленої цементом, та пористого асфальтобетону істотно зростає довговічність конструкції, яка, за експертною оцінкою, досягає близько 24 років. У перспективі це дає змогу знизити енерговитрати під час наступного капітального ремонту приблизно на 10 %.

Водночас екологічні ризики підвищуються орієнтовно на 30 % унаслідок використання бітумомінерального матеріалу під час улаштування узбіч, що може спричинити потрапляння продуктів старіння бітуму до ґрунтових вод.

Альтернатива 3.

Проєктним рішенням передбачено пошарове фрезерування асфальтобетонного покриття. Фрезерування першого шару здійснюється на глибину 4 см з подальшим транспортуванням матеріалу на асфальтобетонний завод для приготування асфальтобетонної суміші типу АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І за технологією гарячого ресайклінгу «в установці» [22] із використанням асфальтобетонної крихти в кількості до 40 % за масою.

Другий шар фрезерується на глибину 6 см з подальшим доставленням матеріалу до установки для виготовлення суміші за технологією холодного ресайклінгу «в установці» з додаванням нового матеріалу в обсязі до 40 % за масою та застосуванням органічного в’яжучого в емульгованому стані.

Фрезерування третього шару виконується на глибину 10 см із подальшим улаштуванням суміші МДХР.КВ.Кз.М20 відповідно до ДСТУ 8976 за технологією холодного ресайклінгу «на дорозі» з додаванням нового матеріалу до 50 % за масою та використанням мінерального в’яжучого (рисунок 4.3).

Рисунок 4.3 – Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (альтернатива 3) [22]

Приведена кошторисна вартість у розрахунку на один квадратний метр становить 2 950 грн. Енергетичні витрати скорочуються за рахунок зменшення обсягів транспортування нового кам’яного матеріалу, що обумовлено повторним використанням асфальтобетонної крихти в кількості до 30 %.

Посилення основи шляхом улаштування шарів із МДХР сприяє підвищенню довговічності конструкції, яка, за експертною оцінкою, становить близько 16 років. У перспективі це забезпечує зниження енерговитрат під час наступного капітального ремонту орієнтовно на 5 %.

Екологічні ризики також зменшуються завдяки використанню бітумомінерального матеріалу при виготовленні МДХР для двох шарів

конструкції, що унеможливлює потрапляння продуктів старіння бітуму до ґрунтових вод (близько 30 %).

Група експертів складалась з трьох осіб. Необхідно обрати одну з технологій дорожнього покриття: альтернатива 1, альтернатива 2, альтернатива 3.

Кожна альтернатива оцінювалась за трьома критеріями: економічні витрати; енергозбереження; екологічна небезпека. За результатами експертизи кожен з експертів виставив бали від 1 до 9, представлені в матриці рішень експерта.

Коефіцієнти важливості критеріїв для кожного експерта відомі (таблиці 4.1 –4.3).

Таблиця 4.1 – Оцінки альтернатив для Експерт 1.

	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	5	2	2
Альтернатива 2	2	1	1
Альтернатива 3	3	7	7

Коефіцієнти важливості критеріїв першого експерта $w_1^1 = 0,4; w_2^1 = 0,25; w_3^1 = 0,35$

Таблиця 4.2 – Оцінки альтернатив для Експерт 2.

	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	6	3	2
Альтернатива 2	1	1	2
Альтернатива 3	2	7	6

Коефіцієнти важливості критеріїв першого експерта $w_1^1 = 0,3; w_2^1 = 0,2; w_3^1 = 0,5$

Таблиця 4.3 – Оцінки альтернатив для Експерт 3.

	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	6	2	4
Альтернатива 2	1	1	1
Альтернатива 3	3	6	5

Коефіцієнти важливості критеріїв першого експерта $w_1^1 = 0,25; w_2^1 = 0,45; w_3^1 = 0,3$

Крок 1. Побудова нормованої матриці рішень для кожного *k*-го експерта. Вихідну матрицю рішень кожного експерта перетворюємо в нормовану матрицю відповідно до виразу () (рисунки 4.4 – 4.6).

Експерт 1	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	5	2	2
Альтернатива 2	2	1	1
Альтернатива 3	3	7	7
	6,164	7,348	7,348

Експерт 1	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,811	0,272	0,272
Альтернатива 2	0,324	0,136	0,136
Альтернатива 3	0,487	0,953	0,953

Рисунок 4.4 – Нормована матриця рішень для Експерта 1

Експерт 2	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	6	3	2
Альтернатива 2	1	1	2
Альтернатива 3	2	7	6
	6,403	7,681	6,633

Експерт 2	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,937	0,391	0,302
Альтернатива 2	0,156	0,130	0,302
Альтернатива 3	0,312	0,911	0,905

Рисунок 4.5 – Нормована матриця рішень для Експерта 2

Експерт 3	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	6	2	4
Альтернатива 2	1	1	1
Альтернатива 3	3	6	5
	6,782	6,403	6,481

Експерт 3	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,885	0,312	0,617
Альтернатива 2	0,147	0,156	0,154
Альтернатива 3	0,442	0,937	0,772

Рисунок 4.6 – Нормована матриця рішень для Експерта 3

Крок 2. Побудова ідеального та негативного рішення для кожного експерта (рисунки 4.7-4.9).

Експерт 1	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,811	0,272	0,272
Альтернатива 2	0,324	0,136	0,136
Альтернатива 3	0,487	0,953	0,953
min	0,324	0,136	0,136
max	0,811	0,953	0,953

Рисунок 4.7 – Побудова ідеального та негативного рішення для Експерта 1

Експерт 2	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,937	0,391	0,302
Альтернатива 2	0,156	0,130	0,302
Альтернатива 3	0,312	0,911	0,905
min	0,156	0,130	0,302
max	0,937	0,911	0,905

Рисунок 4.8 – Побудова ідеального та негативного рішення для Експерта 2

Експерт 3	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,885	0,312	0,617
Альтернатива 2	0,147	0,156	0,154
Альтернатива 3	0,442	0,937	0,772
min	0,147	0,156	0,154
max	0,885	0,937	0,772

Рисунок 4.9 – Побудова ідеального та негативного рішення для Експерта 3

$$A_3^+ = \{0{,}811; 0{,}953; 0{,}953\}; \quad A_3^- = \{0{,}324; 0{,}136; 0{,}136\};$$

$$A_2^+ = \{0{,}937; 0{,}911; 0{,}905\}; \quad A_2^- = \{0{,}156; 0{,}130; 0{,}302\};$$

$$A_3^+ = \{0{,}885; 0{,}937; 0{,}772\}; \quad A_3^- = \{0{,}147; 0{,}156; 0{,}154\}.$$

Крок 3. Побудова відстані до ідеального та негативного рішення для кожного експерта (рисунки 4.10-4.12).

Експерт 1	Ідеальне рішення	Негативне рішення
Альтернатива 1	0,527	0,105
Альтернатива 2	0,703	0,000
Альтернатива 3	0,205	0,632

Рисунок 4.10 – Відстані до ідеального та негативного рішення для Експерта 1

Експерт 2	Ідеальне рішення	Негативне рішення
Альтернатива 1	0,486	0,116
Альтернатива 2	0,698	0,0000
Альтернатива 3	0,342	0,551

Рисунок 4.11 – Відстані до ідеального та негативного рішення для Експерта 2

Експерт 3	Ідеальне рішення	Негативне рішення
Альтернатива 1	0,427	0,274
Альтернатива 2	0,724	0,000
Альтернатива 3	0,221	0,623

Рисунок 4.12 – Відстані до ідеального та негативного рішення для Експерта 3

Крок 4. Обчислення агрегованої відстані до ідеального та негативного рішення для всіх експертів за кожною альтернативою (рисунок 4.13).

	Ідеальне рішення	Негативне рішення
Альтернатива 1	0,478	0,150
Альтернатива 2	0,708	0,000
Альтернатива 3	0,249	0,601

Рисунок 4.13 – Агреговані відстані до ідеального та негативного рішення для всіх експертів

Крок 5. Обчислення відносної наближеності до ідеального рішення (рисунок 4.14).

Альтернатива 1	0,239
Альтернатива 2	0,000
Альтернатива 3	0,707

Рисунок 4.14 – Відносна наближеність до ідеального рішення

Крок 6. Ранжування альтернатив відповідно до значень, отриманих на кроці 5.

$$\textit{Альтернатива}\ 3 \succ \textit{Альтернатива}\ 1 \succ \textit{Альтернатива}\ 2$$

За результатами виконаних розрахунків встановлено, що альтернатива 3 має найвищий пріоритет. альтернатива 3 характеризується відносно нижчими капітальними витратами порівняно з іншими розглянутими рішеннями, а також передбачає використання значного обсягу вторинних бітумомістких матеріалів під час улаштування основи.

Зазначені особливості забезпечили переваги альтернативи 3 за критеріями «Енергоємність» та «Екологічна небезпека», що дозволило йому випередити інші альтернативи, включені до аналізу.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі магістра проведено аналіз проблеми вибору дорожнього покриття для автомобільних доріг. Визначено, що якість дорожнього покриття залежить від матеріалів (асфальт, бетон, щебінь), стану його поверхні (рівність, відсутність вибоїн), відповідності стандартам та інфраструктурних аспектів (ширина смуг, дренаж), що визначає безпеку та комфорт пересування, причому найкращі дороги у світі часто мають високий рейтинг завдяки інвестиціям та технологіям. Обрано мету, об’єкт, предмет і задачі дослідження.

В другому розділі розроблено структурну модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва. Розглянуто економічне обґрунтування вибору варіанту конструкцій дорожнього одягу.

В третьому розділі проведено аналіз багатокритеріальних методів прийняття рішень. Для розв’язання поставленого завдання пропонується використовувати – метод TOPSIS. Завдяки своїй простоті, гнучкості та наочності, він знаходить широке застосування в різних галузях.

В четвертому розділі наведено приклад вибору оптимальної технології дорожнього покриття на основі методу TOPSIS для групи експертів. Розрахунки виконувались у MS Excel.

Наукова новизна: набув подальшого розвитку метод TOPSIS шляхом його поширення на новий клас об’єктів – вибір оптимальної технології дорожнього покриття за багатьма функціональними та витратними критеріями.

Результати дослідження доповідалися та обговорювалися науково-практичній конференції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Рябова С. Економіка асфальту: на що впливає погана якість доріг. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mind.ua/publications/20199838-ekonomika-asfaltu-na-shcho-vplivae-pogana-yakist-dorig.

2. Гончаренко Ф. П. Розвиток мережі автомобільних доріг в Україні // Дороги і мости. 2006. Вип. 4. – С. 46-69.

3. Збитки України від війни перевищили $170 млрд – основні втрати Дзеркало тижня. Україна. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zn.ua/ukr/ECONOMICS/zbitki-ukrajini-vid-vijni-perevishchili-170-mlrd-osnovni-vtrati.html

4. Заворицький В.Й., Аленіч М.Д., Кизима С.С. Транспортно-експлуатаційні якості автомобільних доріг. – К.: ІСЛО, 1995. – 136 с.

5. Які дороги найякісніші у світі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://bestrental.com.ua/ua/rejting-stran-po-kachestvu-dorog/

6. Кашканов А. А., Кашканов В. А., Кужель В. П. Транспортно-експлуатаційні якості автомобільних доріг та міських вулиць: навчальний посібник – Вінниця: ВНТУ, 2018.– 113 с.

7. Губа В. В. Фактори, які впливають на зчіпні якості дорожніх покриттів. Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. 2008. № 2(7). С 94-98.

8. Цинка А. О., Ілляш С. І., Зеленовський В. А. Удосконалення будівельних норм для якісного проєктування та будівництва автомобільних доріг // Збірник наукових праць «Дороги і мости», 2022. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.110.

9. Безуглий А. О., Ілляш С. І., Тимощук О. Ю. Техніко-економічне обґрунтування вибору варіанту конструкцій дорожнього одягу // Збірник «Дороги і мости», 2015. Вип. 15, С. 27-34.

10. ВБН В.2.3-218-186-2004 Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу.

11. ВБН В.2.3-218-008-97 Споруди транспорту. Проектування та будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів.

12. Петров Е. Г., Новожилова М. В., Гребеннік І. В. Методи і засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах: навч. посібн. / За ред. Е. Г. Петрова - К.: Техніка, 2004.-256 с.

13. Кузніченко С. Д., Бучинська І. В. Моделі, методи та інструментальні засоби багатокритеріального аналізу рішень в геоінформаційних системах: монографія. Житомир: ТОВ «505», 2021. 202 с.

14. Творошенко І.С. Технології прийняття рішень в інформаційних системах: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 120 с.

15. Бідюк П.І., Тимощук О.Л., Коваленко А.Є., Коршевнюк Л.О. Системи і методи підтримки прийняття рішень. – Київ. Національний технічний університет України, «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2022. – 610 с.

16. Aloini D., Dulmin R., Mininno V., Pellegrini L., Farina G. (2018) Technology assessment with IF-TOPSIS: An application in the advanced underwater system sector // Technological Forecasting and Social Change. Vol. 131. P. 38–48. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.07.010.

17. 4. Burkina N., Naumova M. Searching for a bank behavior credit strategy under crisis using nonparametric research methods // Actual problem of economics. – 2016. – № 1 (175). – P. 340-347.

18. . Романченко І. С. Потьомкін М. М. Метод TOPSIS та його використання для багатокритеріального порівняння альтернатив. // Системи обробки інформації. 2016. № 138. С. 104–106.

19. Hwang C. L. A New Car Selection in the Market using TOPSIS Technique // International Journal of Engineering Research and General Science. – 2014. – №4. – С. 177–181.

20. Roszkowska E. Multi-criterial decision making models be appleing the TOPSIS method to crisp and interval date. // International Journal of Engineering Research and General Science. 2010. С. 200–230.

21. Шатківська, Н. В., Буркіна Л. О. Про застосування методу TOPSIS для прийняття оптимальних рішень споживачами // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Економіка. 2021. – Вип. 2 (70). – С. 147–152.

22. Головко С. К. Аналіз варіантів конструкцій нежорсткого дорожнього одягу із застосуванням методу аналізу ієрархій // Збірник наукових праць «ДОРОГИ І МОСТИ», 2022. С. 31-39. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.031.

23. Філь Н. Ю., Коломієць І.О., Мажит Мирас. Цифровізація та автоматизація – майбутнє транспортної інфраструктури // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених, 25 листоп. 2025 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2025. – С. 378–382.

Додаток А

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(ХНАДУ)

Механічний факультет

Кафедра автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

магістра

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ TOPSIS ДЛЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф. О. Г. Гурко

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доцент І. Г. Ільге

Керівник, канд. техн. наук, доцент Н. Ю. Філь

Студент МА-61-24 І.О. Коломієць

Харків-2025

ЗМІСТ

1. Мета, об'єкт, предмет і задачі дослідження…… 3

2. Структурна модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва ……..... 4

3. Загальна постановка задачі ……..…… 5

4. Етапи методу TOPSIS ……. 6

5. Альтернативи…… …….. 7

6. Оцінки альтернатив експертами …… 8

7. Нормовані матриці рішень …… 9

8. Побудова ідеального та негативного рішення…….. 10

9. Побудова відстані до ідеального та негативного рішення для кожного експерта ……..…….. 11

10. Обчислення агрегованої відстані до ідеального та негативного рішення для всіх експертів…… 12

11. Висновки …… 13

МЕТА, ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є підвищення ефективності проєктів дорожнього будівництва за рахунок розробки методу для вибору технології дорожнього покриття за багатьма критеріями..

Об'єкт дослідження – проєкти дорожнього будівництва.

Предмет дослідження – метод TOPSIS для вибору дорожнього покриття за багатьма функціональними та вартісними критеріями.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

− провести аналіз проблеми автомобільно-дорожнього будівництва;

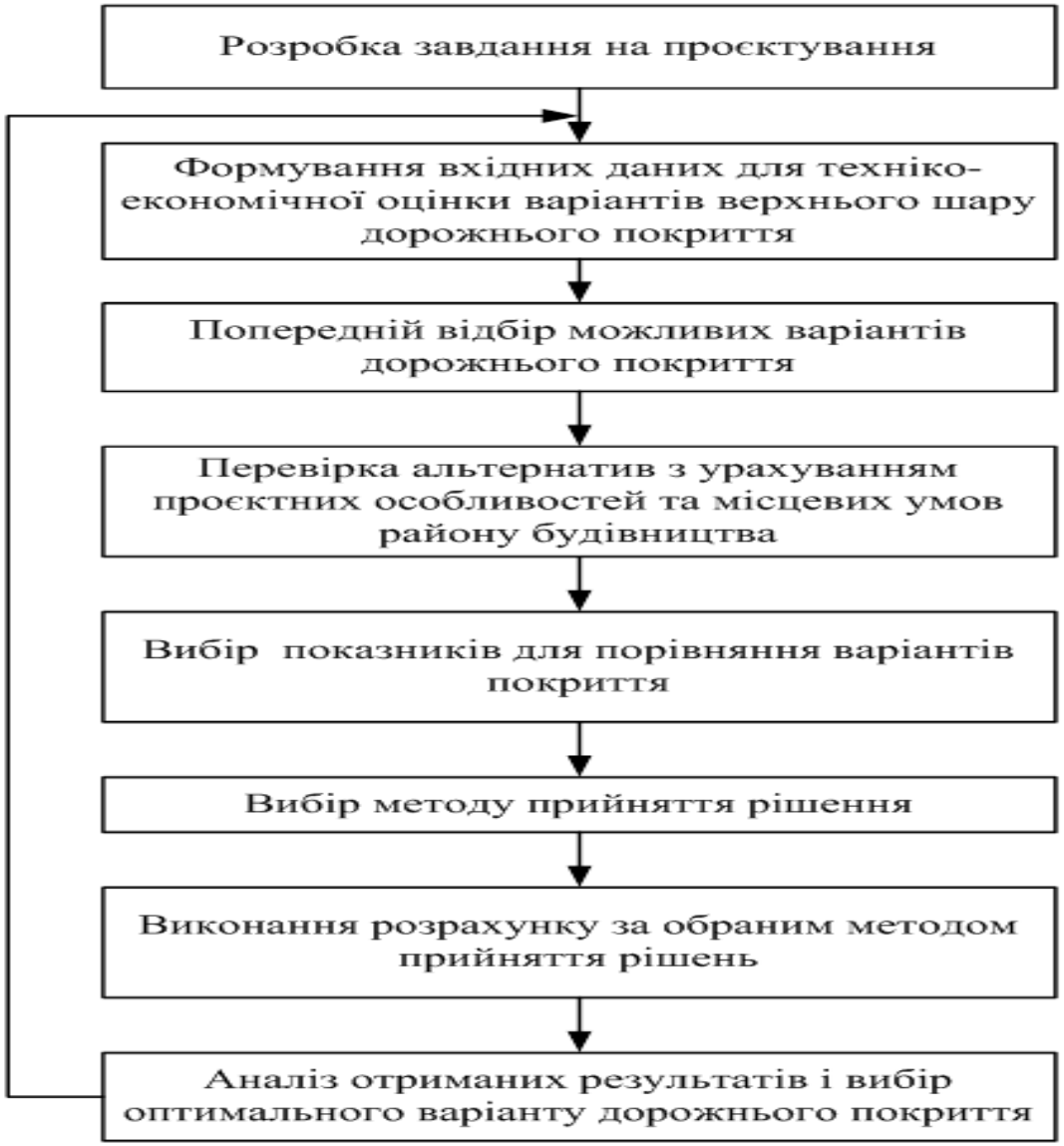
− розробити структурну модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття;

− провести аналіз багатокритеріальних методів прийняття рішень;

− розробити метод вибору дорожнього покриття за багатьма критеріями;

− навести приклад використання розробленого методу вибору дорожнього покриття за багатьма критеріями.

Структурна модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва



ЗАГАЛЬНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відомо множина альтернатив дорожнього покриття для обраної ділянки дороги $X = \{X_i\}, \left(i = \overline{1,m}\right)$, множина техніко-економічних критеріїв $K = \{K_j\}, \left(j = \overline{1,n}\right)$.

Оцінки всіх альтернатива за кожним критерієм представлені у вигляді матриці

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}, \left(i = \overline{1,m};\ j = \overline{1,n}\right).$$

Необхідно обрати найкраще рішення за всіма критеріями.

ЕТАПИ МЕТОДУ TOPSIS

Крок 1. Нормалізація матриці рішень

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}, \left(i = \overline{1,m}; j = \overline{1,n}\right) \quad (1)$$

Крок 2. Знаходження зваженої нормалізованої матриці: кожне значення множиться на відповідний коефіцієнт ваги критерію для отримання матриці, позначеної

$$V_i = \sum_{j=1}^{n} w_j r_{ij}; \left(i = \overline{1,m}\right), \quad \sum_{j=1}^{n} w_j = 1. \quad (2)$$

Крок 3. Обчислення позитивних (ПІР) та негативних (НІР) ідеальних рішень:

$$A^+ = \left\{v_1^+; v_2^+; \ldots, v_m^+\right\}, \quad A^- = \left\{v_1^-; v_2^-; \ldots, v_m^-\right\} \quad (3)$$

Крок 4. Розраховуються відстані кожної альтернативи від ПІР та НІР:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^+\right)^2}, \quad d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \quad (4)$$

Крок 5. Розрахунок близькості кожної альтернативи та ранжування:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, \left(i = \overline{1,m}\right) \quad (5)$$

АЛЬТЕРНАТИВИ

Рисунок 7.1 - Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (альтернатива 1)

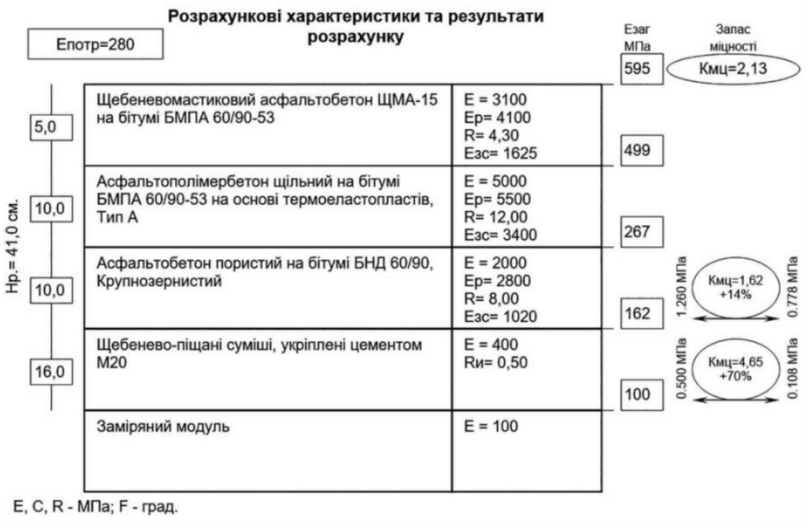


Рисунок 7.2 - Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (альтернатива 2)

Рисунок 7.3 - Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу (альтернатива 3)

ОЦІНКИ АЛЬТЕРНАТИВ ЕКСПЕРТАМИ

Експерт 1	Приведена вартість	Енергозбереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	5	2	2
Альтернатива 2	2	1	1
Альтернатива 3	3	7	7

Коефіцієнти важливості критеріїв

$w_1^1 = 0,4; w_2^1 = 0,25; w_3^1 = 0,35$

Експерт 2	Приведена вартість	Енергозбереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	6	3	2
Альтернатива 2	1	1	2
Альтернатива 3	2	7	6

$w_1^1 = 0,3; w_2^1 = 0,2; w_3^1 = 0,5$

Експерт 3	Приведена вартість	Енергозбереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	6	2	4
Альтернатива 2	1	1	1
Альтернатива 3	3	6	5

$w_1^1 = 0,25; w_2^1 = 0,45; w_3^1 = 0,3$

НОРМОВАНІ МАТРИЦІ РІШЕНЬ

Експерт 1	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	5	2	2
Альтернатива 2	2	1	1
Альтернатива 3	3	7	7
	6,164	7,348	7,348

Експерт 1	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,811	0,272	0,272
Альтернатива 2	0,324	0,136	0,136
Альтернатива 3	0,487	0,953	0,953

Рисунок 9.1 – Нормована матриця рішень для Експерта 1

Експерт 2	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	6	3	2
Альтернатива 2	1	1	2
Альтернатива 3	2	7	6
	6,403	7,681	6,633

Експерт 2	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,937	0,391	0,302
Альтернатива 2	0,156	0,130	0,302
Альтернатива 3	0,312	0,911	0,905

Рисунок 9.2 – Нормована матриця рішень для Експерта 1

ПОБУДОВА ІДЕАЛЬНОГО ТА НЕГАТИВНОГО РІШЕННЯ

Експерт 1	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,811	0,272	0,272
Альтернатива 2	0,324	0,136	0,136
Альтернатива 3	0,487	0,953	0,953
min	0,324	0,136	0,136
max	0,811	0,953	0,953

Рисунок 10.1 - Побудова ідеального та негативного рішення для Експерта 1

Експерт 2	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,937	0,391	0,302
Альтернатива 2	0,156	0,130	0,302
Альтернатива 3	0,312	0,911	0,905
min	0,156	0,130	0,302
max	0,937	0,911	0,905

Рисунок 10.2 - Побудова ідеального та негативного рішення для Експерта 2

Експерт 3	Приведена вартість	Енерго-збереження	Екологічна небезпека
Альтернатива 1	0,885	0,312	0,617
Альтернатива 2	0,147	0,156	0,154
Альтернатива 3	0,442	0,937	0,772
min	0,147	0,156	0,154
max	0,885	0,937	0,772

Рисунок 10.3 - Побудова ідеального та негативного рішення для Експерта 3

$$A_1^+ = \{0{,}811; 0{,}953; 0{,}953\}; \quad A_1^- = \{0{,}324; 0{,}136; 0{,}136\};$$

$$A_2^+ = \{0{,}937; 0{,}911; 0{,}905\}; \quad A_2^- = \{0{,}156; 0{,}130; 0{,}302\};$$

$$A_3^+ = \{0{,}885; 0{,}937; 0{,}772\}; \quad A_3^- = \{0{,}147; 0{,}156; 0{,}154\}$$

ПОБУДОВА ВІДСТАНІ ДО ІДЕАЛЬНОГО ТА НЕГАТИВНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ КОЖНОГО ЕКСПЕРТА

.

Експерт 1	Ідеальне рішення	Негативне рішення
Альтернатива 1	0,527	0,105
Альтернатива 2	0,703	0,000
Альтернатива 3	0,205	0,632

Рисунок 11.1 - Відстані до ідеального та негативного рішення для Експерта 1

Експерт 2	Ідеальне рішення	Негативне рішення
Альтернатива 1	0,486	0,116
Альтернатива 2	0,698	0,0000
Альтернатива 3	0,342	0,551

Рисунок 11.2 - Відстані до ідеального та негативного рішення для Експерта 2

Експерт 3	Ідеальне рішення	Негативне рішення
Альтернатива 1	0,427	0,274
Альтернатива 2	0,724	0,000
Альтернатива 3	0,221	0,623

Рисунок 11.3 - Відстані до ідеального та негативного рішення для Експерта 3

ОБЧИСЛЕННЯ АГРЕГОВАНОЇ ВІДСТАНІ ДО ІДЕАЛЬНОГО ТА НЕГАТИВНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ВСІХ ЕКСПЕРТІВ

	Ідеальне рішення	Негативне рішення
Альтернатива 1	0,478	0,150
Альтернатива 2	0,708	0,000
Альтернатива 3	0,249	0,601

Рисунок 12.1 - Відстані до ідеального та негативного рішення для Експерта 1

Альтернатива 1	0,239
Альтернатива 2	0,000
Альтернатива 3	0,707

Рисунок 12.2 - Обчислення відносної наближеності до ідеального рішення

$$Альтернатива\ 3 \succ Альтернатива\ 1 \succ Альтернатива\ 2$$

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі магістра проведено аналіз проблеми вибору дорожнього покриття для автомобільних доріг. Визначено, що якість дорожнього покриття залежить від матеріалів (асфальт, бетон, щебінь), стану його поверхні (рівність, відсутність вибоїн), відповідності стандартам та інфраструктурних аспектів (ширина смуг, дренаж), що визначає безпеку та комфорт пересування, причому найкращі дороги у світі часто мають високий рейтинг завдяки інвестиціям та технологіям. Обрано мету, об’єкт, предмет і задачі дослідження.

В другому розділі розроблено структурну модель інформаційної технології вибору дорожнього покриття в проєктах дорожнього будівництва. Розглянуто економічне обґрунтування вибору варіанту конструкцій дорожнього одягу.

В третьому розділі проведено аналіз багатокритеріальних методів прийняття рішень. Для розв’язання поставленого завдання пропонується використовувати метод TOPSIS. Завдяки своїй простоті, гнучкості та наочності, він знаходить широке застосування в різних галузях.

В четвертому розділі наведено приклад вибору оптимальної технології дорожнього покриття на основі методу TOPSIS для групи експертів. Розрахунки виконувались у MS Excel.

Наукова новизна: набув подальшого розвитку метод TOPSIS шляхом його поширення на новий клас об’єктів - вибір оптимальної технології дорожнього покриття за багатьма функціональними та витратними критеріями.

Результати дослідження доповідалися та обговорювалися науково-практичній конференції.

.